

CORRESPONDING TO Korean Application  
No. 1999-0071784



US005719796A

United States Patent [19]  
Chen

[11] Patent Number: 5,719,796  
[45] Date of Patent: Feb. 17, 1998

[54] SYSTEM FOR MONITORING AND  
ANALYZING MANUFACTURING  
PROCESSES USING STATISTICAL  
SIMULATION WITH SINGLE STEP  
FEEDBACK

6338552 6/1994 Japan .  
2 126 374 3/1984 United Kingdom .  
WO95/31003 11/1995 WIPO .

#### OTHER PUBLICATIONS

[75] Inventor: Vincent Ming Chun Chen, Milipitas,  
Calif.

Schneider et al: ControlShell—A real-time software frame-  
work. IEEE, Jan. 1991.

[73] Assignee: Advanced Micro Devices, Inc.,  
Sunnyvale, Calif.

Root et al: Statistical circuit simulation with  
measurement-based active device models—Implications for  
process control and IC manufacturability, IEEE, Jan. 1995.

[21] Appl. No.: 566,529

Astin: Creating a Mixed-signal simulation capability for  
concurrent IC design and test program development,  
IEEE, Aug. 1993.

[22] Filed: Dec. 4, 1995

Chee K. Chow, Projection of Circuit Performance Distribu-  
tion by Multivariate Statistics, May 1989, pp. 60–65, IEEE  
Transactions on Semiconductor Manufacturing vol. 2 No. 2.

[51] Int. Cl.<sup>6</sup> ..... G06G 7/48

[52] U.S. Cl. .... 364/578; 364/468.15; 364/474.16;  
364/551.02; 364/554; 364/570; 364/478.1

[58] Field of Search ..... 364/578, 488,  
364/490, 468.03, 468.15, 474.03, 474.22,  
474.29, 474.37, 474.17, 474.24, 474.26,  
560, 551.02, 468.16, 552, 554, 148, 468–28,  
491, 551.01, 188, 468.02, 468.04, 468.01,  
468.21, 468.24, 468.28, 474.16, 550, 570,  
571.01; 395/500, 22, 27, 800, 10

#### [56] References Cited

##### U.S. PATENT DOCUMENTS

4,827,395	5/1989	Anders et al. ....	364/468.15
4,887,218	12/1989	Natarajan .....	364/468.08
4,901,242	2/1990	Kotan .....	364/468.15
4,937,765	6/1990	Shupe et al. ....	364/578
5,105,362	4/1992	Kotani .....	364/468.28
5,111,404	5/1992	Kotani .....	364/468.15
5,115,502	5/1992	Tallman .....	395/500
5,301,118	4/1994	Heck et al. ....	364/578
5,365,463	11/1994	Donath et al. ....	364/578
5,418,974	5/1995	Craft et al. ....	364/578
5,495,417	2/1996	Fuduka et al. ....	364/468.28
5,539,652	7/1996	Tegethoff .....	364/490

##### FOREIGN PATENT DOCUMENTS

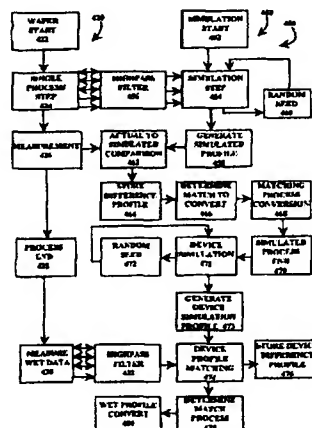
63-174331	7/1988	Japan .
1131470	5/1989	Japan .
5267421	10/1993	Japan .

Primary Examiner—Jacques Louis-Jacques  
Attorney, Agent, or Firm—Skjerven, Morrill, MacPherson,  
Franklin & Friel LLP; Ken J. Koestner

#### [57] ABSTRACT

A statistical simulation of a semiconductor fabrication process is performed in parallel with the actual process. Input parameters derived from a probability density function are applied to the simulator which, in turn, simulates an actual fabrication process which is modeled as a probability density function. Each simulation step is repeated with a random seed value using a Monte Carlo technique, a trial-and-error method using repeated calculations to determine a best solution to a problem. The simulator generates an output in the form of a probability distribution. The statistical simulation uses single-step feedback in which a simulation run uses input parameters that are supplied or derived from actual in-line measured data. Output data generated by the simulator, both intermediate output structure data and WET data, are matched to actual in-line measured data in circumstances for which measured data is available. The probability density structure of the simulator is adjusted after each simulation step so that simulated data more closely matches in-line measured data.

20 Claims, 10 Drawing Sheets





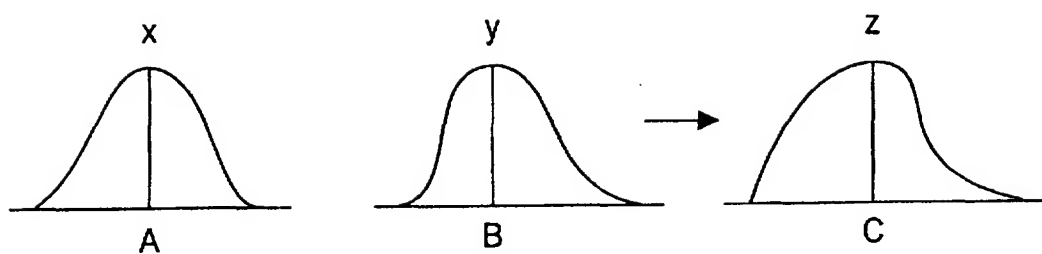


FIG. 1



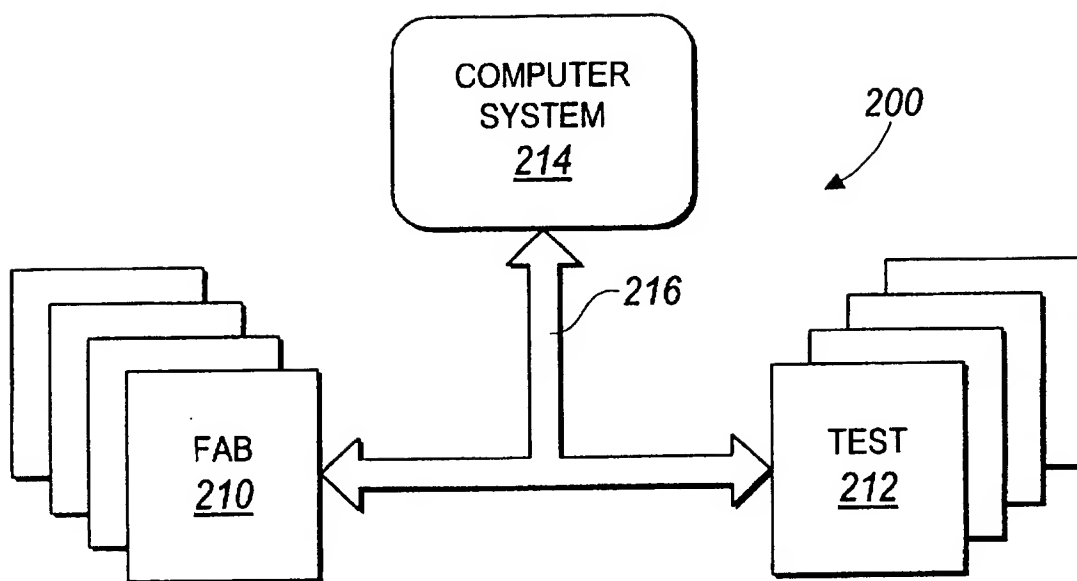
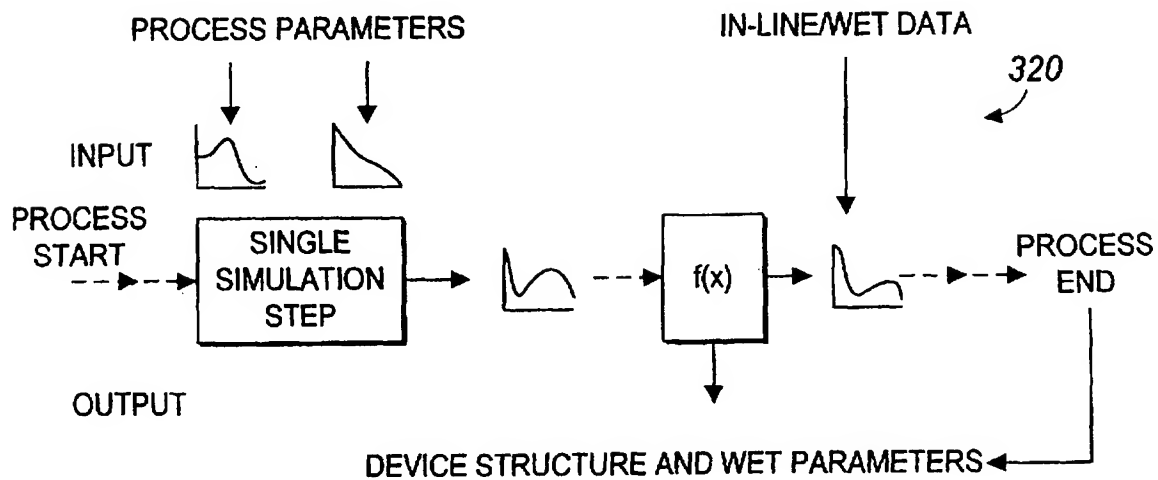
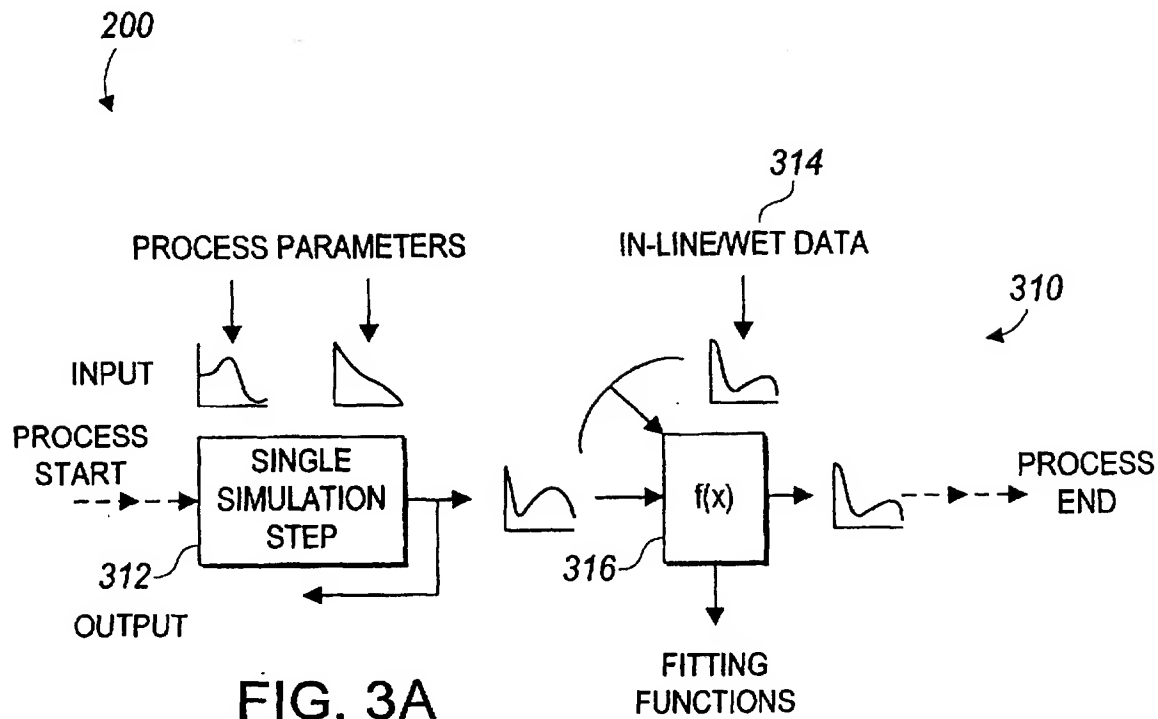
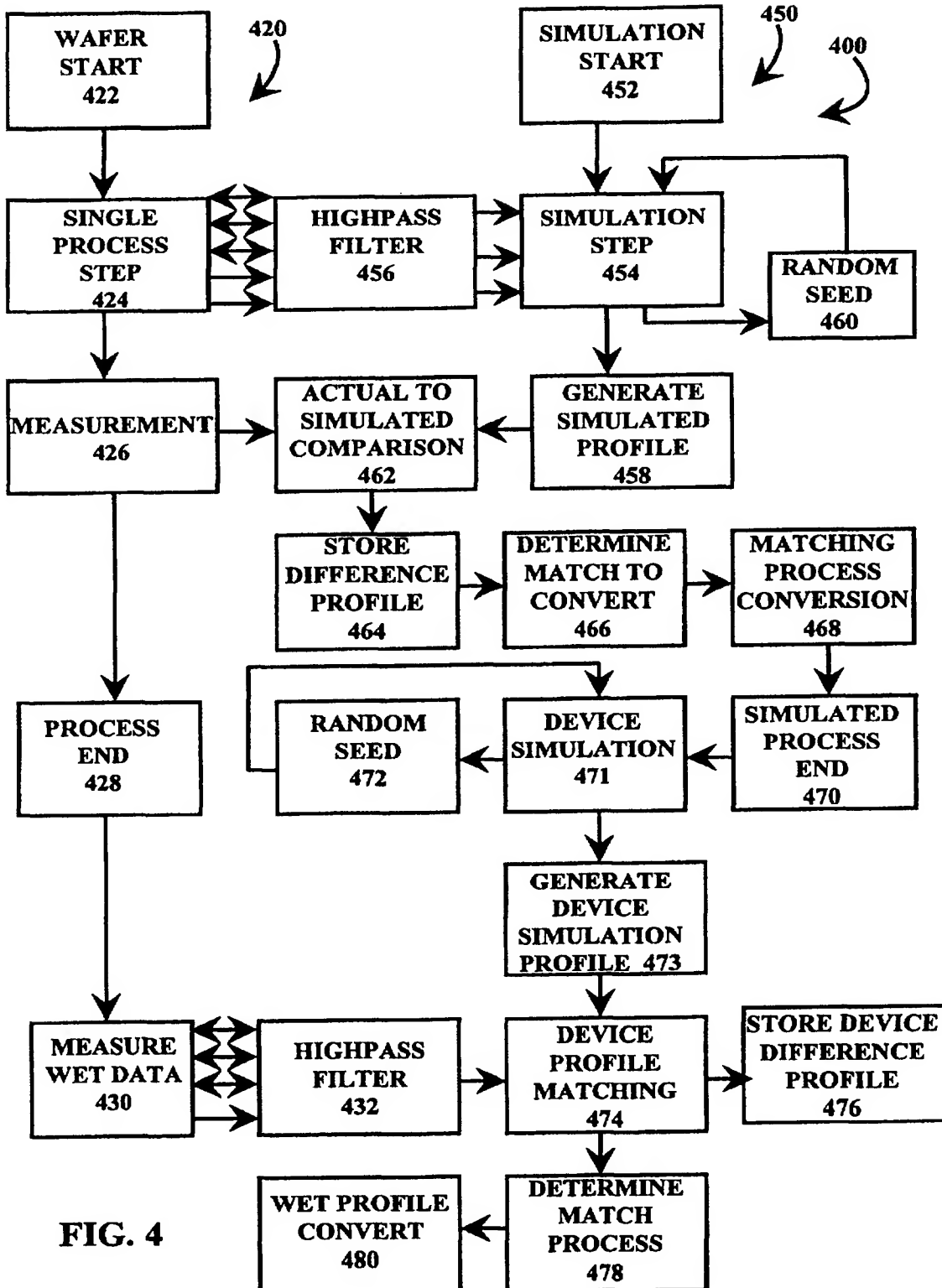


FIG. 2











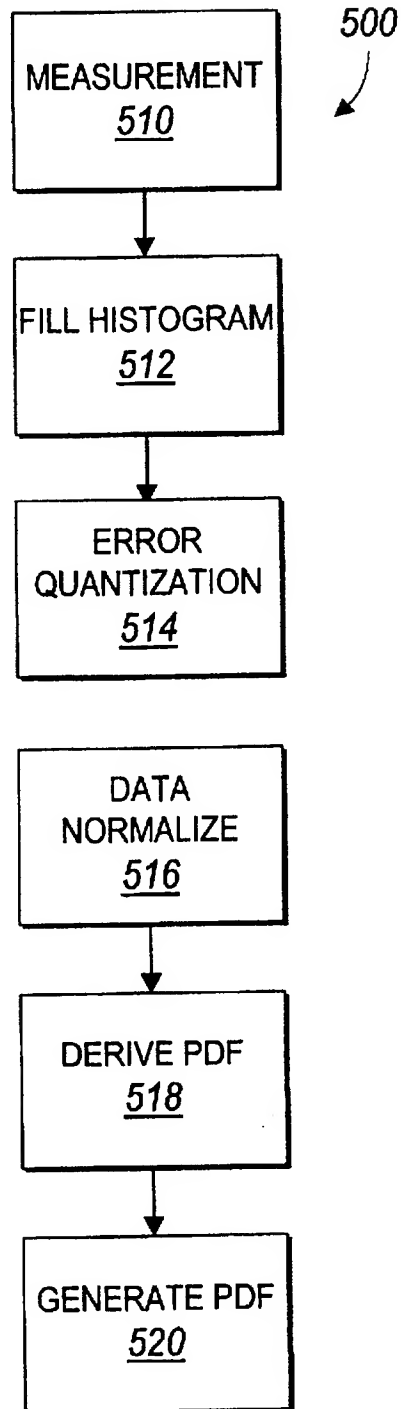


FIG. 5



FIG. 6A



FIG. 6B

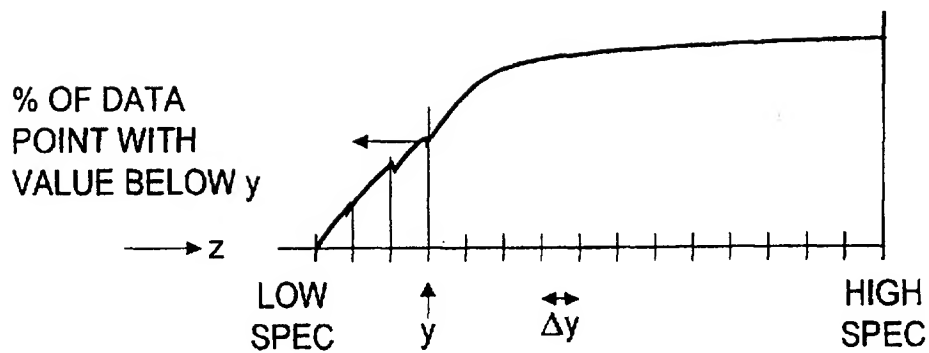
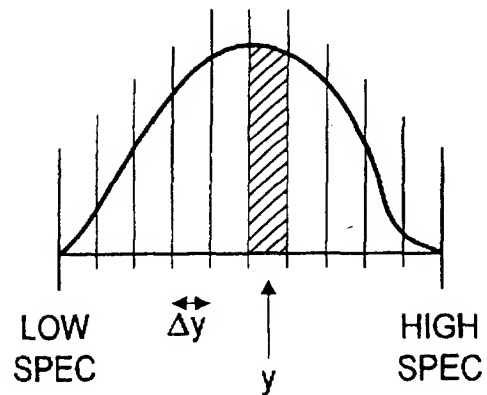
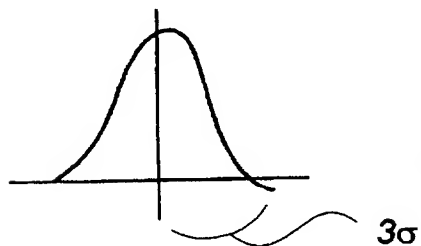
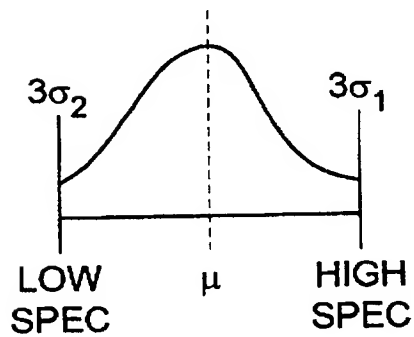
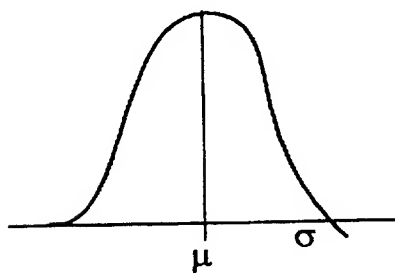
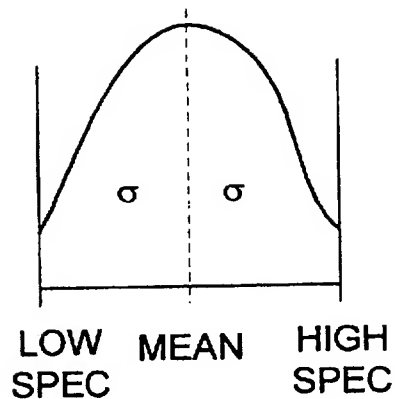


FIG. 6C







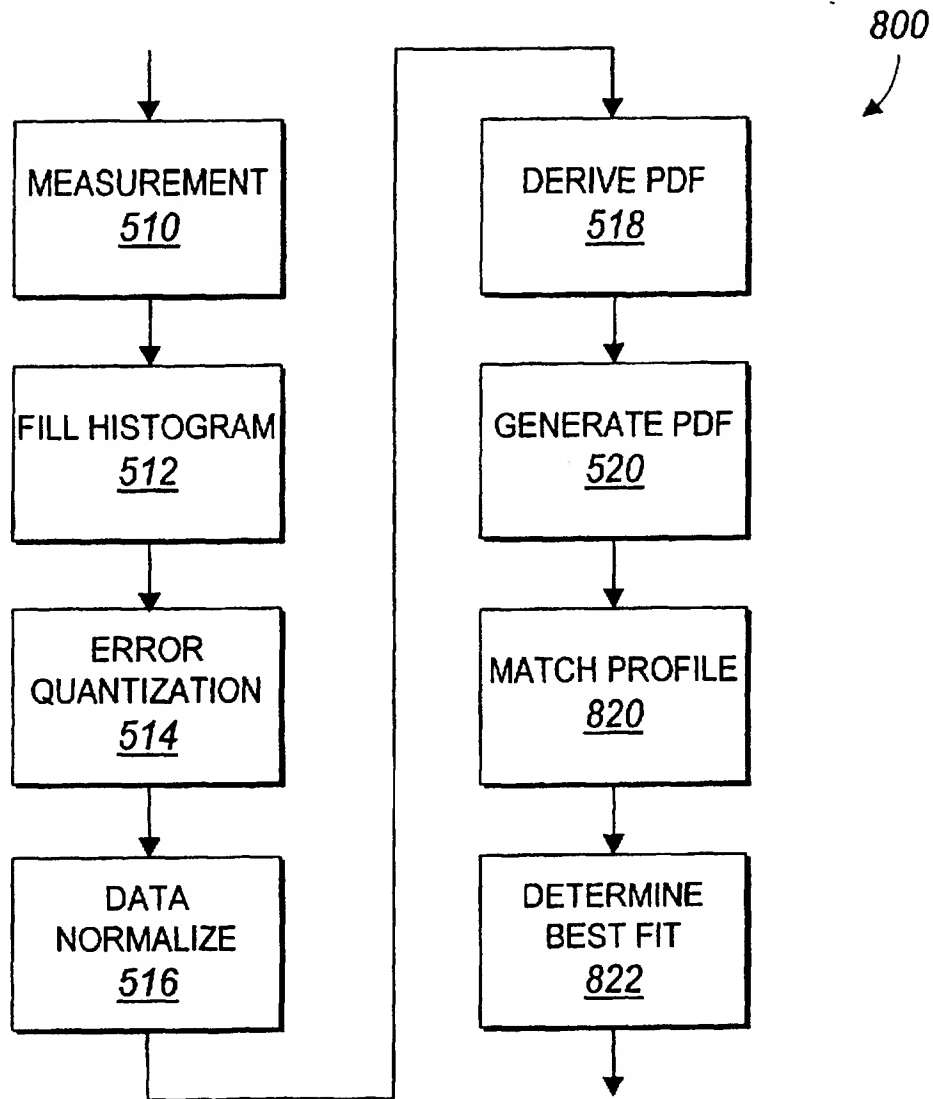


FIG. 8



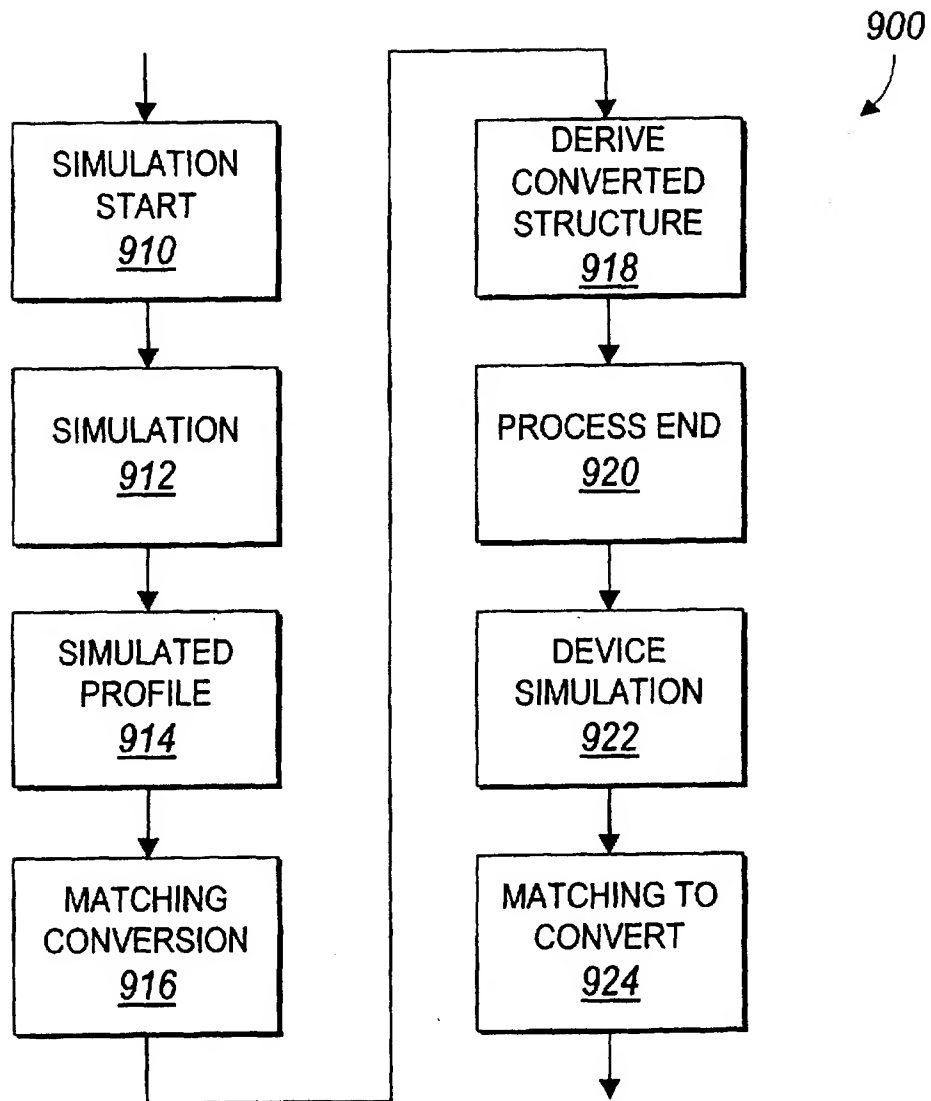


FIG. 9



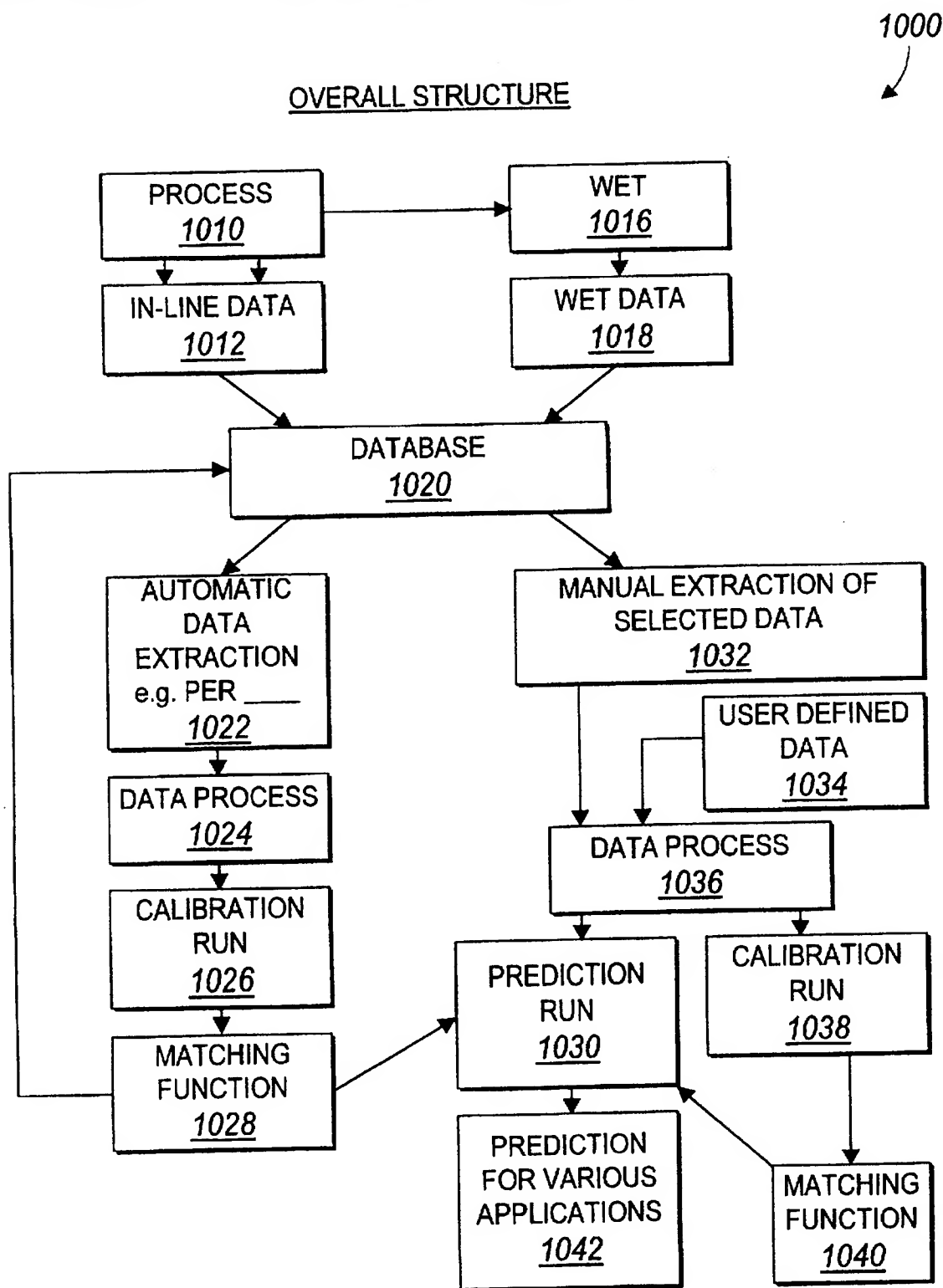


FIG. 10



# SYSTEM FOR MONITORING AND ANALYZING MANUFACTURING PROCESSES USING STATISTICAL SIMULATION WITH SINGLE STEP FEEDBACK

## FIELD OF THE INVENTION

The present invention relates to manufacturing processes such as integrated circuit fabrication processes. More specifically, the present invention relates to a feedback system for analyzing and monitoring a manufacturing process.

## BACKGROUND OF THE INVENTION

Process simulation is the usage of processing experiments, typically using a computer, as directed by mathematical models created to describe a process phenomena. Many simulation and analysis tools (for example, Pisces, Medici, Suprem3, Suprem4 and PdFab) have been developed to assist process integration and device development. These tools have not been as widely employed for integrated circuit manufacturing. Generally, these tools are developed primarily for research and development purposes and do not adequately address various difficulties that arise in the manufacturing environment.

Several characteristics are generally applicable to the manufacturing environment and distinguish the manufacturing environment from a process integration and device development environment. One characteristic of the manufacturing environment is that measurable aspects of processes have a fundamentally statistical nature, rather than a deterministic nature. Process variations and measurement errors are inherent to manufacturing processes so that substantially all data measured in a manufacturing environment is statistical. Exact measurement values are generally not available for each device at each stage of a manufacturing process so that a single data point is insufficient to justify a decision relating to the process. For example, if it is known that application of input parameters A and B to a fabrication process to yield an output variable C, what is truly known is that input parameters A and B each have a statistical profile that, when combined in the fabrication process, yield a statistical profile C shown in FIG. 1. The most useful information available in a manufacturing environment is the form of the statistical profile which results from the process. Unfortunately, nearly all information that is utilized in the manufacturing environment and all input parameters to a fabrication tool are expressed in the form of single-valued parameters, rather than in statistical profiles.

While conventional simulation and analysis tools do not suitably address the statistical nature of manufacturing processes, these tools are also deficient in failing to take advantage of the extensive process variables, in-line measurements and Wafer Electrical Testing (WET) data measurements that are available. WET testing includes testing for various device electrical parameters including threshold voltage and drive current that are measured at a wafer level, before bonding. Conventional simulation and analysis tools designed for research and development generally presume that a fabrication process is not yet operational for actual manufacturing. Therefore, these conventional simulation and analysis tools are not sufficiently flexible for a manufacturing engineer to make optimizations of the process. Specifically, these conventional tools do not allow the manufacturing engineer to utilize the extensive statistical data that is available in a manufacturing process to optimize the

simulation model. Furthermore, for simulation tools that use either an empirical approach or an analytical approach, the model fitting parameters do not have sufficient degrees of freedom to match the extensive data that are available from an actual manufacturing process.

Another characteristic of the manufacturing environment is that monitoring of manufacturing processes and improvement of these processes is a fine-tuning process. Each tuning step includes a measurement of small differences in process variables with these differences being attributable at least in part to statistical fluctuations and also to complicated interactions between multiple reactions of the process as various process parameters are modified. Process results are typically difficult to measure with accuracy. A large number of highly variable factors influence process results. Modification of a single factor in isolation from other factors is difficult. This difficulty arises not only from a limited understanding of a factor's influence on the process but also because the various factors cause complex inter-related cross effects and interactions. Thus, a simulation and analysis tool that a production engineer confidently uses needs to supply a much higher order of measured precision of the data. Mere indications of data trends are insufficient. What is sought in the development of manufacturing tools and techniques is not a drastic change in a fabricated structure, but rather a small adjustment in characteristics. For example, what typically produces an improvement in an integrated circuit structure, such as an LDD structure in a transistor, is a change in dopant dosage of about ten percent or a change in applied temperature of 100° C. The combination of the small size of the adjustments which are achieved by process modifications and the difficulty in measuring results of the modifications accurately manifest a disadvantageous characteristic of the manufacturing environment akin to a poor signal-to-noise ratio in signal processing.

Manufacturing simulation tools are calibrated prior to performing a simulation test. Calibration is typically accomplished by entering calibrated input parameters that are generated either experimentally or by previous simulation. In conventional manufacturing process calibration, a specified value of a parameter is fitted to produce a specified process output value. Realistic simulation results are rarely achieved using conventional simulation and calibration techniques since these techniques do not capture the true nature and complexity of the manufacturing process. Furthermore, conventional calibration processes require an intense study of device engineers before a simulation tool becomes useful. Thus, the calibration processes cause significant delay in process qualification and improvement. This problem is worsened by the fact that calibration procedures are repeated continuously as the environment in the manufacturing area changes over time.

These characteristics of the manufacturing environment are applicable to an analysis of manufacturing monitoring as well as process improvements. For example, it is often desirable to know how processes change over time to track changes in fabrication results of a small amount, such as 3 percent, over time, for example 3 weeks to yield an ultimate result. Furthermore, these small differences are typically measured in an environment of statistical fluctuation and measurement error.

Although many characteristics of the manufacturing environment are disadvantageous, several are advantageous. One advantage is that specification of the structure resulting from the manufacturing process is well defined. Another advantage is that actual in-line measurement data acquired at various stages of the manufacturing process and actual WET



data are plentiful and easily available. These data include statistical profile data that are highly informative regarding the manufacturing process.

What is sought is a technique for tracking and analyzing manufacturing processes such that inaccuracies arising from statistical fluctuations, complicated interactions, and measurement errors are avoided or compensated so that process modifications that produce even small differences can be measured, monitored and analyzed.

### SUMMARY OF THE INVENTION

In accordance with the present invention, a statistical simulation of a semiconductor fabrication process is performed in parallel with the actual process. Input parameters extracted from actual fabrication data and expressed in the form of a probability density function are applied to the simulator which, in turn, simulates an actual fabrication process which is modeled as a probability density function. Each simulation step is repeated with a random seed value using a Monte Carlo technique, a trial-and-error method using repeated calculations to determine a best solution to a problem. The simulator generates an output in the form of a probability distribution.

The statistical simulation uses single-step feedback in which a simulation run uses input parameters that are supplied or derived from actual in-line measured data. Output data generated by the simulator, both intermediate output structure data and WET data, are matched to actual in-line measured data in circumstances for which measured data is available. The probability density structure of the simulator is adjusted after each simulation step so that simulated data more closely match in-line measured data. The essence of the single-step feedback is that one dedicated series of Monte Carlo simulations exists for the calibration of each individual process step, using calibration results from all of the previous steps. For example, if a process includes fifty process steps and one hundred Monte Carlo simulation steps are needed to build the calibration model, then the simulation process will include 5000 simulation steps in the calibration process, each starting from the first step to the calibrating step.

The statistical simulation includes two types of simulation runs including calibration runs and prediction runs. Both types of simulation runs are statistical simulations which employ a probability density function as a basic elementary unit.

The calibration run calibrates simulated output data to match actual in-line measured data. A simulation operator specifies the actual in-line measured data to be employed for the calibration run. For example, in a typical fabrication process, particular process parameters including fabrication tool-specific parameters, temperatures, pressures, deposition material concentrations, and the like, are specified independently. Results of calibration runs are compared and parameters are updated as a result of these comparisons so that the process is specialized for selected fabrication characteristics.

The described process has many advantages. One advantage is that the described apparatus and method combine statistical analysis of extensive available measurements with feedback to an in-line manufacturing process line. In addition, the automatic calibration feature of the statistical simulation method advantageously complements manual calibration of a fabrication process. A simulation operator maintains the capability to manually calibrate fabrication parameters by simply changing parameter values in the simulator. The automatic calibration feature facilitates

manual calibration by furnishing a calibration framework in which specific parameters are modified independently and the results of these modifications are easily tracked. Thus, a whole range of calibration information is acquired that independently tracks modifications in specified parameters using single-step feedback.

Another advantage of the disclosed method is that the defect rate of fabricated devices is very low due to the reduction in handling. A further advantage of the method that results from the reduced handling is a substantially reduced manufacturing cost.

### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

The features of the invention believed to be novel are specifically set forth in the appended claims. However, the invention itself, both as to its structure and method of operation, may best be understood by referring to the following description and accompanying drawings.

FIG. 1, labeled Prior Art, is a sequence of graphs which illustrate a black-box analysis of a manufacturing process, showing statistical profiles of two process input parameters which, in combination, yield a statistical profile of an output variable.

FIG. 2 is a block diagram showing components of a simulation system in accordance with an embodiment of the present invention.

FIGS. 3A and 3B are block diagrams illustrating a two-run process of the simulation system shown in FIG. 2.

FIG. 4 is a flow chart of a calibration process of a statistical simulation method in accordance with an embodiment of the present invention.

FIG. 5 is a flow chart of a measured data highpass filtering operation of the calibration process shown in FIG. 4.

FIGS. 6(A), 6(B) and 6(C) are a sequence of graphs which illustrate intermediate results of a measured data highpass filtering operation depicted in FIG. 5.

FIGS. 7(A), 7(B), 7(C), and 7(D) are a sequence of graphs which illustrate intermediate results of a specified data highpass filtering operation.

FIG. 8 is a flow chart which illustrates steps of a matching operation for matching actual data to simulated data. The matching operation is a step of the calibration process described with respect to FIG. 4.

FIG. 9 is a flow chart which illustrates steps of a prediction process of a statistical simulation method in accordance with an embodiment of the present invention.

FIG. 10 is a flow chart showing elements of an overall structure of a fabrication system in accordance with an embodiment of the present invention.

### DETAILED DESCRIPTION

FIG. 2 is a block diagram showing components of a simulation system 200, including various fabrication equipment 210, various test equipment 212 for measuring process parameters and a simulation computer system 214. In an actual fabrication process, typically a plurality of fabrication equipment 210 is employed to carry out different steps of the fabrication process. At several stages of the fabrication process, process parameters are acquired using the test equipment 212. Acquired process parameter data are conveyed to the simulation computer system over a transmission path 216. The transmission path 216 is any suitable communication system such as transmission wires or network lines. Other data transmission methods may include



manual techniques such as conveyance by magnetic disk. Examples of fabrication equipment 210 include CVD reactors, vacuum pumps, ion implantation equipment, deposition equipment, photolithography equipment, optical aligners, photomasks, wafer cleaning equipment, wet etching equipment and the like. Examples of test equipment 212 include residual gas analyzers, spectral analyzers, electrical probes, optical dosimetry measurement equipment, optical microscopes, laser reflectometry equipment, spectroscopes and similar data acquisition tools that are known in the art of manufacturing. The simulation computer system 214 is any suitable computer system which includes common computational functionality and common communication operations for receiving process data. In one exemplary embodiment, a SUN SPARC 20™ application server with a network of x86 PC interface clients are employed as the computer system 214. A customized PdFab™ simulation tool and conventional software, including Microsoft Excel™ and Microsoft Access™ are used to process data.

The simulation system 200 is a simulation and analysis tool for a manufacturing environment that incorporates several objective properties. First, the simulation system 200 provides for simulation and analysis in which data is input, processed and output with an arbitrary statistical distribution profile since actual fabrication data statistics may not be distributed in a Gaussian profile. Second, the simulation system 200 furnishes a capability to utilize any measured data, if available, to improve the accuracy of simulation results. The simulation system 200 also allows data supplementation to achieve a best possible simulation even if some statistical data is not measurable or is otherwise unavailable. Third, the simulation system 200 is flexible and allows models underlying the simulation to be upgraded and improved. Fourth, the simulation system 200 performs substantially all operations promptly and automatically without conflicts with existing data collection and analyzing systems in the fabrication.

Referring to FIGS. 3A and 3B, two-run process of the simulation system 200 includes two different run modes of operation, specifically a calibration run 310 depicted in FIG. 3A, and a prediction run 320. In the calibration run 310 depicted in FIG. 3A, available data are processed to generate fitting functions for matching simulated and measured data. The calibration run 310 includes a single simulation step 312 and actual measurements 314. Results of the simulation step 312 and the actual measurements 314 are processed according to a fitting function 316. The calibration run 310 includes a series of single simulation steps 312, each with corresponding actual measurements (both process parameters and in-line/WET data) 314. Results of a plurality of the simulation steps 312 and the actual measurements 314 are processed to produce a fitting function 316. Each simulation step 312 processes data accumulated using all fitting functions previously calculated during the calibration run 310.

In the prediction run 320 depicted in FIG. 3B, measured data and the fitting functions calculated in the calibration run 310 are used to predict unknown data. During the prediction run 320, if any process parameter is missing from the existing database, the statistical distribution function used in the corresponding calibration run 310 replaces the missing parameter. If any WET data or in-line parameter is contained in the existing dataset, these WET data or in-line parameters replace computed values without changing fitting functions.

Referring to FIG. 4, a flow chart of a calibration process 400 of the statistical simulation method is shown. The calibration process 400 includes two parallel processes including an actual in-line process 420 and a simulation

process 450. The actual in-line process 420 includes with a wafer start step 422 for initializing process parameters takes place, a single process step 424 for performing a single selected fabrication process step, a measurement step 426 for measuring a result of the selected fabrication process, a process end step 428 for terminating the selected fabrication process and the measure WET data step 430 for measuring WET data parameters. Adjustment of different process steps, which are suitable for simulation analysis, of a plurality of suitable process steps is performed independently in this manner. A process step which is suitable for simulation is a process step that: (1) produces a fabrication result that is important to the functionality or structure of an integrated circuit, (2) produces a measurable result, (3) is capable of simulation, and (4) responds to changes in simulation parameters with differences in function or structure. Examples of suitable process steps include pad oxidation before channel implant, gate oxidation, gate etch and spacer oxide steps. Typically, two types of output data are measured that result from a fabrication process step, including vertical dimension data and horizontal dimension data. Examples of vertical dimension data include oxide growth, gate oxide thickness, polysilicon thickness data and the like. Horizontal dimension data include polysilicon gate length and LDD spacer width, for example.

Doping profile data results from processes which are assumed to be stable so that a doping profile is typically known, allowing simulation on the basis of theoretical estimations of parameter values, rather than measured data. In one example of a suitable selected fabrication process, the single process step 424 performs a gate oxidation process and the in-line measurement step 426 measures a data profile of oxide thickness.

Corresponding steps of the simulation process 450 are performed in parallel with steps of the actual in-line process 420. A simulation start step 452 begins the simulation process 450 in response to initializing data from the actual in-line process 420. The wafer start step 422 generates initial data, such as orientation data, that is measured and transferred to the simulation process 450, typically through a manufacturing control system, such as Workstream™, the remote access channel of the manufacturing control system, such as Remote Workstream™, and a network connection to the application server, such as TCP/IP. A simulation start step 452 initializes parameters of the simulation process 450 to arbitrary, user-defined values. Following the simulation start step 452, a simulation step 454 simulates the actual process step performed in single process step 424, first using arbitrary, user-defined parameters and later adapting the parameter values on the basis of actual in-line measurements. Various miscellaneous input parameters such as processing time are designated by the test operator. These input parameters are applied to the single process step 424 and the simulation step 454. Input data may be applied in several formats. However, the input data is converted into a statistical distribution function before actual processing begins. For an array of input data points, data is sorted and the probability of a data value being between any two consecutive data points is assumed to be the same. For data presented in statistical form, such as data with a mean, standard deviation and range limits, the data is modeled in a statistical distribution function as a truncated Gaussian profile for usage as a statistical distribution function. For data presented in a statistical form, such as a mean and range limits, the data is modeled in a statistical distribution function as a truncated Gaussian profile with each specified limit being presumed to deviate from the mean value by three



standard deviations. If the mean is not centered between the range limits, the function is modeled as an asymmetric profile and is considered the combination of two half-Gaussian profiles that have the same population and different standard deviations. For data presented in a statistical form, such as a mean and standard deviation, the data is modeled in a statistical distribution function as a Gaussian profile. Data presented as a single data point is used only for parameters that are insignificant when no additional information is unavailable. Each actual or simulation result, including intermediate results, is applied to the simulation and process as a statistical distribution function, rather than a single data point. Thus, a statistical distribution function is the elementary data type in the simulation system 200.

Simulation step 454 operates on the basis of statistical simulation in which a simulation step is repeated many times. Each single simulation run computes one value from each input statistical distribution function, processes the input values in accordance with a corresponding physical or device model, and obtains a value for each output statistical distribution function. A higher number of simulation repetitions results in improved accuracy in the output distribution.

One example of an input processing parameter is a processing time parameter. In addition, various actual in-line measurements are acquired during the single process step. Results of these in-line measurements are communicated to the simulation step 454 by a highpass filter step 456. The highpass filter step 456 filters input parameters and in-line measured data from the single process step 424 and performs digitized processing to generate an output of a discrete probability density function. Simulation results from the simulation step 454 are applied to a generate simulated profile step 458 and to a random seed step 460. The random seed step 460 updates a seed value for Monte Carlo technique simulation and applies the updated seed value to the simulation step 454. The generate simulated profile step 458 constructs a simulated profile which is used for matching analysis of actual and simulated results. The simulation takes place in a plurality of Monte Carlo steps, each step including one pass through the simulation and random seed steps 454 and 460.

Multiple-pass feedback steps that are performed in the simulation and random seed steps 454 and 460 are illustrative of a single-step feedback concept for performing calibration of the simulation system 200. Each single simulation step is evaluated independently of other simulation steps. In one simulation step, data are measured and applied to a simulation step and results of the simulation are fed back to the process. Simulation results are used only to compute the fitting function for data measured within the simulation step. Using the single-step feedback concept, measured data is flexibly used to improve simulation accuracy while the interaction between different simulation steps and propagation error are reduced.

The single-step feedback concept is substantially different from conventional simulations in which an entire simulation is completed in each simulation run with intermediate output values of all simulation steps being assembled and the output fitting function being calculated all at one time.

Subsequent to the single process step 424, the in-line measurement step 426 measures the data profile of oxide thickness and communicates the data profile result to an actual data to simulated data comparison step 462. The actual data to simulated data comparison step 462 receives simulated data from the generate simulated profile step 458 and actual in-line data from the in-line measurement step

426, and compares these data profiles digital sample by digital sample, for example by calculating the point-by-point difference of the profiles. The difference profile is stored in store difference profile step 464. A determine matching process to convert step 466 determines whether to convert simulated profile data using previous simulated data or actual data on the basis of the difference profile determined by the data comparison step 462. A conversion operation is performed on the simulated profile in matching process conversion step 468 which iteratively converts the simulated profile received from the generate simulated profile step 458 on the basis of the difference profile received from the data comparison step 462. The matching process conversion step 468 combines the difference profile and the simulated profile and produces a conversion function. The conversion function is then used to match any arbitrary simulated point to a converted simulated point for latter simulation. One way to obtain the conversion function uses Newton's interpolation. Thus, for a data range defined by actual measured data, Newton's interpolation is used to define a continuous function based on percentile matching. For a data range not defined by actual measured data, a third order polynomial is used to define the continuous function. This matching method furnishes a suitable balance between flexibility and accuracy.

After each single process step and each simulation step is complete and the simulated profile is generated, additional process steps may be performed and additional simulation process steps including various simulation, highpass filter, generate simulated profile, random seed, actual data to simulated data comparison, store difference profile and determine matching process to convert and matching process conversion steps may be performed for the application of additional fabrication processes. For each single process step of actual in-line fabrication and each corresponding simulation, a full actual in-line process and a full simulation are performed, using random input parameter data, so that independent processing stages are performed with actual fabrication steps proceeding in parallel with simulated steps.

Following all actual process steps, actual processing terminates with an actual process end step 428 and the measure WET data step 430 measures the final output data of the fabrication process and generates a WET data profile. The WET data is processed in a highpass filter step 432 to generate filtered WET data.

Following all simulated process steps, simulation terminates with a simulated process end step 470 and a full device simulation step 471 is performed by device simulation step 471 step 472. The device simulation step 472 incorporates profile information derived in previous simulation steps and utilizes Monte Carlo analysis using random seed simulations. A generate device simulation profile step 473 generates a device profile that corresponds to the actual calculated WET data. A device profile matching step 474 compares the WET data to the device data generated by the device simulation step 471 digital sample by digital sample, for example by calculating the point-by-point difference of the profiles. This device difference profile is stored in store device difference profile step 476. A determine matching process to convert WET data step 478 determines whether to convert simulated profile data using previous simulated WET data or actual WET data on the basis of the difference profile determined by the device profile matching step 474. A conversion operation is performed on the simulated WET data in WET statistical profile conversion step 480 to generate the final output profile of the calibration process 400.



Output data that is generated by the calibration process 400 includes all of the matching profiles and all simulated profiles.

In some embodiments of the calibration process 400, the actual in-line process 420 and the simulation process 450 are completely automatic, being performed in parallel, simultaneously and in real time. In other embodiments, the actual in-line process 420 and the simulation process 450 are performed in parallel but not in real time so that the various actual process steps and simulation steps are performed generally independently but with data acquired from measurements on the actual in-line process 420, filtered off-line in steps such as the highpass filter step 456, and communicated to the simulation process 450, off-line.

In some embodiments of the calibration process 400, in-line data extraction from the actual in-line process 420 is automated and the highpass filtering in steps such as the highpass filter step 456 is operated for pre-selected samples of actual in-line data automatically and periodically.

Referring to FIGS. 6(A), 6(B) and 6(C) in conjunction with a flow chart shown in FIG. 5, a highpass filtering operation for highpass filtering measured data is described graphically. The highpass filtering operation is performed in the highpass filter steps 432 and 456 shown in FIG. 4, for example. FIG. 5 is a flow chart depicting steps of a highpass filter operation 500 for filtering measured data. Data is measured in measurement step 510 and measured data is counted in each of a plurality of quantized error ranges  $\delta x$  in fill histogram step 512. Data is in the form of process parameters, in-line measurements and WET data. Generally, process parameters include any suitable and meaningful process parameters that may be measured, observed or specified during a fabrication process. Suitable process parameters include furnace temperatures and deposition times, for example. In-line measurements include any measurements of process results such as oxide thickness for a gate oxidation process step, polysilicon thickness for deposition steps, and the like. WET data includes electrical parameter measurements such as threshold voltage ( $V_{th}$ ), saturation threshold voltage ( $V_{sat}$ ), maximum transconductance ( $G_m$ ) and saturation current ( $I_{dsat}$ ). Process steps of pad oxidation before channel implant, gate oxidation, gate etch and spacer oxide steps are considered most influential for controlling these WET data parameters. A process parameter designates a specified parametric value which serves as an input parameter to a process. The in-line measurements and WET data are measured as results or applied as input parameters to the process.

FIG. 6(A) shows a histogram of actual in-line data measurement values shown on the horizontal axis in a quantized error range  $\delta x$  and the number of data points falling within each  $\delta x$  range of measurement values on the vertical axis. The highpass filtering operation described with respect to FIGS. 6(A), 6(B) and 6(C) operates on measured and observed data.

Referring again to FIG. 5, error quantization step 512 modifies quantization of the error term  $\delta x$  into a step size  $\delta y$  in a predetermined manner so that each  $\delta y$  is the largest value which is less than  $\delta x$  and equal to the difference between the maximum and minimum value  $x$  divided by an arbitrary integer  $n$ . FIG. 6(B) shows a histogram of actual in-line parameter values shown on the horizontal axis in terms of the  $n$  groupings of quantized step size  $\delta y$ . These values are normalized in data normalize step 516 so that each histogram value indicates a percentage of the total number of data points falling within each step size range.

Derive probability density function step 518 function step 516 calculates a probability density function of the actual in-line parameter values. An example of the probability density function is shown in FIG. 6(C). Generate probability density table step 520 assembles a table of  $n$  probability density function values in ascending order of steps  $\delta y$ .

Referring to FIGS. 7(A), 7(B), 7(C) and 7(D), a highpass filtering operation for highpass filtering specified data is described graphically. For specified data, a probability density function is derived theoretically rather than experimentally so that no data is processed. Specified data is specified by various statistical parameters. In one example, specified data is specified by a mean parameter value  $\mu$ , a standard deviation value  $\sigma$ , a maximum parameter value and a minimum parameter value so that a probability density function is fitted to a Gaussian distribution as is shown in FIG. 7(A). In another example, specified data is specified by a mean parameter value  $\mu$  and a standard deviation value  $\sigma$  alone so that a probability density function is fitted to a Gaussian distribution as is shown in FIG. 7(B). In a further example, specified data is specified by a mean parameter value  $\mu$ , a maximum parameter value and a minimum parameter value so that a probability density function is fitted to an asymmetric Gaussian distribution as is shown in FIG. 7(C). In another example, specified data is specified by a mean parameter value  $\mu$  alone so that a probability density function is estimated to a Gaussian distribution as is shown in FIG. 7(D). Generally, a more suitable probability density function is calculated when more parameters are supplied as opposed to fewer parameters.

Referring to FIG. 8, a matching operation 800 for usage in the actual data to simulated data comparison step 462 and the device profile matching step 474, both shown in FIG. 4, is illustrated by a flow chart. First, actual data is highpass filtered in the manner described with respect to FIG. 5. Specifically, the matching operation 800 includes the fill histogram step 512, the error quantization step 514, the data normalize step 516, the derive probability density function step 518 and the generate probability density table step 520. In a match profile step 820, the probability density table for simulated data generated in a step which generates simulated data such as generate simulated profile step 458 and the generate device simulation profile step 473, both shown in FIG. 4 is fitted to the probability density table for the actual data generated by the generate probability density table step 520. Profile fitting is performed by forcing the step sizes of the simulated profile  $\delta y'$  so that the percentage of the total number of data points falling within each variable step size range of the simulated profile matches the percentage of data points in each fixed step size range of the actual data profile. In this manner, a difference profile is generated which includes a 4 times  $n$  array of step samples. For each of the  $n$  step size samples, four elements are stored including an amplitude number indicative of the percentage of total data points for each step element, the ascending fixed-size  $\delta y$  steps for the actual data, the ascending variable-size  $\delta y'$  steps for the fitted simulated data and elements indicative of the difference step sizes  $\delta y - \delta y'$ .

In a determine best fit step 822, a best fit function for the amplitude number is derived using a selected fitting function, as is known in the art, such as a polynomial fit function, a spline function or the like. In one example of a best fit function, a constant function is applied and residue (difference) calculated, then a linear polynomial fit is applied and residue calculated. If the difference is residue is less than a designated amount, a constant function furnishes a best fit. If neither the constant nor the linear polynomial functions



supply a best fit, a second order polynomial function is applied. Similarly, higher order polynomial functions are applied until a best fit is found. Generally, the best simulator is a simulator in which the best fit is a constant function or, if a constant function does not yield a best fit, a lower order polynomial function.

One advantage that is achieved by the matching operation 800 is a high simulation accuracy based on the automatically-obtained precise fitting function between a calibration output statistical distribution and actual data. This operation statistically fits two data populations for which the entire percentile distribution is known so that the fitting function for a range of parameters and data measurements is simply calculated by a direct percentile correlation. This means, for example, that 10%, 35%, and 75% of the output statistical distribution function is mapped to 10%, 35%, and 75% of the actual data. Data values between two data points is accurately measured by interpolation.

A further advantage of the matching operation 800 is that the process is flexible and applicable for substantially any profile for any number of data samples. Another advantage is that the fitting function applies to out-of-range data points. A further advantage is that low pass and high pass filters may be applied to the resulting data to compensate for measurement inaccuracy.

The matching operation 800 also handles out-of-range data and predicts possible outcomes that result from application of experimental process parameters that have values outside conventional limits. Therefore, the matching operation 800 extends beyond the region defined by calibration data. From numerical analysis theory, the higher the extrapolation function order, the larger the possible error. To compromise the accuracy and flexibility of the fitting function, a third-order polynomial is used for the fitting function in a region not defined by calibration data.

Following the calibration process, a prediction process is performed. The operator specifies input parameters for the prediction process including any operator-selected input parameters or profiles. Any input parameters that are not specified default to parameters or profiles that are derived in the calibration process. Referring to FIG. 9, a prediction process 900 begins with a simulation start step 910 in which operator-specified input parameters and profiles are entered and default input parameters and profiles are installed. In user-defined simulation step 912, a simulation is performed and profile derived using user-specified data and data from a processed table. Following the simulation step 912, a simulated profile is generated in simulated profile step 914. A matching conversion step 916 combines the difference profile and the simulated profile and produces a conversion function. A converted structure is derived in step 918. Various process parameters are simulated in this manner until a process end step 920 terminates the prediction simulation. A device simulation is then performed in device simulation step 922. A profile generated from the device simulation is then matched in matching to convert step 924, thus generating simulated WET data.

The WET data derived from device simulation is determined in precisely the same manner as the in-line data after process simulation, using the same matching and conversion techniques.

One advantage of the simulated process method is that simulated and actual data are all treated uniformly and in a statistical, rather than deterministic, manner. Another advantage is that all actual in-line data and WET data are available for usage in improving the accuracy of the simulation.

Furthermore, for an improved-stability fabrication process, data fitting is substantially automatic. In addition, physical calibration of the process is not necessary so that automatic calibration is possible by simulation is achieved before a fabrication tool is used in manufacturing. An additional advantage is that simulated data achieve improved parameter accuracy.

Referring to FIG. 10, an overall structure of a fabrication system 1000 is shown in block diagram form. In this system 1000, a fabrication process 1010, as circuits are fabricated, generates actual in-line data that is assembled in in-line data block 1012 and information for derivation of WET data measurement step 1016. This WET data is assembled in WET data block 1018. The in-line data and WET data are entered into a database 1020. Data in the database 1020 are processed in automatic data extraction step 1022 at scheduled intervals such as weeks. These data are assembled in data process block 1024 and applied to a calibration process 1026. Matching procedures are implemented in matching function block 1028 to derive profiles and data which are entered into the database 1020. The profiles and data are applied to a prediction process 1030. Selected information in the database 1020 are also manually extracted in manual extraction block 1032 and this data along with operator-supplied data 1034 are applied to a manual data processing block 1036. Data derived in the data processing block 1036 are also applied to the prediction process 1030. A calibration process 1038 is also performed using the data from manual data processing block 1036. Information from the calibration process 1038 is used in a manual matching function block 1040 to derive profiles and data resulting from the manual extraction of selected data, which are also entered for performance of the prediction process 1030. The prediction process 1030 generates prediction information for various applications in block 1042.

One practical use of a calibration run is to simulate a fabrication process, holding all parameters constant, but taking actual in-line data measurements over time. For example, in some embodiments of the method, data may be measured weekly over multiple weeks to detect shifting in process properties over time. Other applications for statistical simulation include monitoring of manufacturing processes, process development and improvement and comparison of data for different manufacturing processes.

The description of certain embodiments of this invention is intended to be illustrative and not limiting. Numerous other embodiments will be apparent to those skilled in the art, all of which are included within the broad scope of this invention.

What is claimed is:

1. A manufacturing monitoring system comprising:
  - a fabrication equipment for performing a fabrication process step applied to a workpiece;
  - a test equipment for acquiring a sample of a process test parameter sensed from the workpiece;
  - a computer coupled to the test equipment to receive the process test parameter sample;
  - a software program operable upon the computer system, the software program having a plurality of routines including:
    - a routine for receiving the process test parameter sample;
    - a routine for simulating a simulated fabrication process step which corresponds to the fabrication process step to generate a plurality of simulated fabrication process results, routine for simulating being a statis-



13

tical simulation of a semiconductor fabrication process further including:

- a simulation loop routine using single-step feedback in which a simulation step of a plurality of simulation steps uses input parameters that are supplied from actual in-line measured data and generates output data;
- a subroutine for matching output data generated by the simulation step against actual in-line measured data; and
- a subroutine for adjusting a probability density structure of the simulator after each simulator step so that the simulated data more closely matches the actual in-line measured data; and
- a routine for generating a simulated profile indicative of the simulated fabrication process results.

2. A system according to claim 1, wherein the software program further includes:

- a Monte Carlo simulation routine for iteratively updating simulation results using a random seed value.

3. A system according to claim 1, wherein the software program further includes:

- a routine for formatting a plurality of process test parameter samples into a process data profile; and
- a routine for matching the process data profile to the simulated profile.

4. A system according to claim 1, wherein the software program simulating routine is a statistical simulation of a semiconductor fabrication process further comprising:

- a subroutine for deriving an input parameter to the simulation from an actual fabrication process parameter, the input parameter being derived from a probability density function; and
- a subroutine for simulating an actual fabrication process, the actual fabrication process being modeled as a probability density function.

5. A system according to claim 4, wherein the software program simulating routine is performed in parallel with the fabrication process step.

6. A system according to claim 4, wherein the software program simulating routine is a statistical simulation of a semiconductor fabrication process further comprising:

- a subroutine for repeating a plurality of simulation steps, the repeated steps applying a varying random seed value that is varied using a Monte Carlo technique.

7. A software program encoded on a computer-usable medium having computable readable code embodied therein controlling a manufacturing monitoring system, the manufacturing monitoring system including a fabrication equipment for performing a fabrication process step applied to a workpiece, a test equipment for acquiring a sample of a process test parameter sensed from the workpiece, a computer coupled to the test equipment to receive the process test parameter sample and having a memory, and the software program loadable into the memory and executable on the computer, the software program having a plurality of routines including:

- a routine for receiving the process test parameter sample;
- a routine for simulating a simulated fabrication process step which corresponds to the fabrication process step to generate a plurality of simulated fabrication process results;
- a routine for generating a simulated profile indicative of the simulated fabrication process results; and
- a routine for controlling the manufacturing monitoring system in response to the generated simulated profile.

14

8. A software program according to claim 7 further comprising:

- a Monte Carlo simulation routine for iteratively updating simulation results using a random seed value.

9. A software program according to claim 7 further comprising:

- a routine for formatting a plurality of process test parameter samples into a process data profile; and
- a routine for matching the process data profile to the simulated profile.

10. A software program according to claim 7 wherein the software program simulating routine is a statistical simulation of a semiconductor fabrication process further comprising:

- a subroutine for deriving an input parameter to the simulation from an actual fabrication process parameter, the input parameter being derived from a probability density function; and

- a subroutine for simulating an actual fabrication process, the actual fabrication process being modeled as a probability density function.

11. A software program according to claim 10, wherein the software program simulating routine is performed in parallel with the fabrication process step.

12. A software program according to claim 10, wherein the software program simulating routine is a statistical simulation of a semiconductor fabrication process further comprising:

- a subroutine for repeating a plurality of simulation steps, the repeated steps applying a varying random seed value that is varied using a Monte Carlo technique.

13. A software program according to claim 10, wherein the software program simulating routine is a statistical simulation of a semiconductor fabrication process further comprising:

- a simulation loop routine using single-step feedback in which a simulation step of a plurality of simulation steps uses input parameters that are supplied from actual in-line measured data and generates output data;
- a subroutine for matching output data generated by the simulation step against actual in-line measured data; and
- a subroutine for adjusting a probability density structure of the simulator after each simulator step so that the simulated data more closely matches the actual in-line measured data.

14. An executable program code encoded on a computer-usable medium having computable readable code embodied therein controlling a manufacturing monitoring system, the manufacturing monitoring system including a fabrication equipment for performing a fabrication process step applied to a workpiece, a test equipment for acquiring a sample of a process test parameter sensed from the workpiece, a computer coupled to the test equipment to receive the process test parameter sample and having a memory, and the software program loadable into the memory and executable on the computer, the software program having a plurality of routines including:

- a routine for receiving the process test parameter sample;
- a routine for simulating a simulated fabrication process step which corresponds to the fabrication process step to generate a plurality of simulated fabrication process results;
- a routine for generating a simulated profile indicative of the simulated fabrication process results; and



## 15

a routine for controlling the manufacturing monitoring system in response to the generated simulated profile.

15. An executable program code according to claim 14 further comprising:

a Monte Carlo simulation routine for iteratively updating simulation results using a random seed value.

16. An executable program code according to claim 14 further comprising:

a routine for formatting a plurality of process test parameter samples into a process data profile; and

a routine for matching the process data profile to the simulated profile.

17. An executable program code according to claim 14 wherein the software program simulating routine is a statistical simulation of a semiconductor fabrication process further comprising:

a subroutine for deriving an input parameter to the simulation from an actual fabrication process parameter, the input parameter being derived from a probability density function; and

a subroutine for simulating an actual fabrication process, the actual fabrication process being modeled as a probability density function.

18. An executable program code according to claim 17 wherein the software program simulating routine is performed in parallel with the fabrication process step.

## 16

19. An executable program code according to claim 17 wherein the software program simulating routine is a statistical simulation of a semiconductor fabrication process further comprising:

a subroutine for repeating a plurality of simulation steps, the repeated steps applying a varying random seed value that is varied using a Monte Carlo technique.

20. An executable program code according to claim 17 wherein the software program simulating routine is a statistical simulation of a semiconductor fabrication process further comprising:

a simulation loop routine using single-step feedback in which a simulation step of a plurality of simulation steps uses input parameters that are supplied from actual in-line measured data and generates output data;

a subroutine for matching output data generated by the simulation step against actual in-line measured data; and

a subroutine for adjusting a probability density structure of the simulator after each simulator step so that the simulated data more closely matches the actual in-line measured data.

\* \* \* \* \*



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>  
H01L 21/66

(11) 공개번호 특1999-0071784  
(43) 공개일자 1999년09월27일

(21) 출원번호	10-1998-0704062	(87) 국제공개번호	WO 1997/21244
(22) 출원일자	1998년 05월 29일	(87) 국제공개일자	1997년 06월 12일
번역문제출일자	1998년 05월 29일		
(86) 국제출원번호	PCT/US1996/15511		
(86) 국제출원출원일자	1996년 09월 27일		
(81) 지정국	EP 유럽특허 : 오스트리아 벨기에 스위스 독일 덴마크 스페인 프랑스 영국 그리스 이탈리아 룩셈부르크 모나코 네덜란드 포르투갈 스웨덴		
	국내특허 : 아일랜드 일본		
(30) 우선권주장	8/566,529 1995년 12월 04일 미국 (US)		
(71) 출원인	아드밴스트 마이크로 디바이시스 인코포레이티드 미키오 이시마루		
	미합중국 캘리포니아주 94088 서니베일시 원 에이엠디이 플레이스		
(72) 발명자	첸 밍 천		
	미국 캘리포니아 95035 밀피타스 소노마 드라이브 1517		
(74) 대리인	박장원		

심사청구 : 없음

(54) 단일시스템 피드백과 통계적 시뮬레이션을 이용하는 제조공정의모니터링, 분석시스템

#### 요약

본 발명은 실제 공정과 동시에 수행되는 반도체 제조공정의 통계적 시뮬레이션에 관한 것이다. 확률밀도 함수에서 도출된 입력파라미터가 시뮬레이터에 입력되고, 상기 시뮬레이터는 확률밀도함수로서 모델화되는 실제 제조공정을 차례로 시뮬레이션한다. 각각의 시뮬레이션시스템은 문제를 가장 잘 해결할 수 있는 결과를 결정하기 위해 반복적인 연산을 하는 시도-오류방법인 몬테카를로 방식을 이용하여 임의의 시도값을 응용하여 반복된다. 상기 시뮬레이터는 확률밀도함수의 형태로 출력을 생성한다. 통계시뮬레이션은 시뮬레이션의 실행에 있어서 실제 인라인측정데이터에서 공급 또는 도출된 입력 파라미터를 이용하는 단일시스템 피드백을 이용한다. 시뮬레이터에 의해서 생성된 출력데이터인 중간 출력구조데이터와 WET데이터는 측정데이터가 유효한 환경에서 실제 인라인측정데이터와 비교된다. 시뮬레이터의 확률밀도구조는 모의데이터가 실제 인라인 측정데이터에 더욱 가깝게 매치하도록 각 시뮬레이션시스템 이후에 조정된다.

#### 영세서

#### 기술분야

본 발명은 집적회로제조공정과 같은 제조공정에 관한 것으로, 특히 제조공정을 분석, 모니터하는 피드백 시스템에 관한 것이다.

#### 배경기술

공정시뮬레이션은 공정에서 일어나는 현상을 설명하기 위해 만들어진 수학적 모델에 의해 제어되고, 특히 컴퓨터를 이용하는 실험공정에 이용된다. 많은 시뮬레이션과 분석연장 (예를 들어, Pisces, Medici, Suprem3, Suprem4, PdFab)이 공정 집적도와 소자의 기술적 향상을 돕기 위해서 꾸준히 연구, 개발되어 왔다. 일반적으로, 이러한 연장들은 주로 탐색과 개발목적으로 발전되어왔으나, 제조환경에서 일어나는 여러 가지 어려움을 적절하게 지적할 수 없는 단점을 가지고 있다.

일반적으로 여러 특징들이 제조환경에 적용되고, 이러한 특징들은 그 제조환경을 처리집적도와 소자 개발 환경으로 부터 구분한다. 제조환경의 특징중 하나는 처리의 측정 가능한 면은 결정론적인 성향보다는 본질적으로 통계적 성향을 가진다는 점이다. 공정의 다양성과 측정오류는 제조공정에서 본래 나타나는 현상이고, 따라서 제조환경에서 측정된 모든 데이터는 사실상 통계적인 데이터이다. 일반적으로 제조 공정의 각 단계에서의 소자에 대한 정확한 측정값을 얻기 어려우므로, 단일 데이터포인트는 공정에 관련된 결정을 하기 위해서는 불충분하다. 예를 들어, 출력변수 C 를 생성하기위한 제조과정에 각각의 통계 프로파일을 가지는 입력파라미터 A 와 B 를 이용하여 제작과정에서 합성되어 도 1에서 보는바와 같은 통계 프로파일 C 를 생성한다. 제작환경에서 이용가능한 가장 유용한 정보는 상기 과정에서 얻어지는 통계적 프로파일형식이다. 그러나, 불행히도 제조환경과 제조연장에 관한 모든입력파라미터에서 이용되는 거의 모든 정보가 통계적 프로파일보다는 1가파라미터의 형식으로 표현되고 있다.

종래의 시뮬레이션과 분석연장은 제조공정의 통계적 성향을 다루는데 적합하지 않고 또한, 인라인 측정, 웨이퍼 전기 실험(WET) 데이터측정, 광범위한 공정변수등을 이용하는데 불충분하다. WET 실험은 본딩전에 웨이퍼 레벨에서 측정되는 문턱전압과 구동전류를 포함한 다양한 소자전기파라미터의 실험을



포함한다. 일반적으로 종래의 분석과 개발을 위한 시뮬레이션과 분석연장들은 제조공정이 실제공정을 위해 조작되지 않는다는 가정 하에 있다. 따라서, 이러한 종래의 시뮬레이션과 분석연장들은 제조기술자가 공정의 최적화를 이루도록 충분히 융통성 있게 작용하지 않는다. 특히, 이러한 종래 연장들로는 제조기술자가 시뮬레이션모델을 최적화 하는 공정에서 이용 가능한 광범위한 통계적 데이터를 활용할 수 없다는 점이다. 더욱이, 실험적접근 또는 분석적접근을 이용한 시뮬레이션연장에서는, 모델적합(fitting)파라미터가 실제 제조공정으로 부터 이용가능한 광범위한 데이터에 필적하는 충분한 자유의 정도를 가지고있지 않다.

제조환경의 또다른 특징중 하나는 제조공정을 모니터하고 개선시키는 것은 미조정(fine-tuning)공정이라는 점이다. 각 조정단계는 공정변수에서의 작은 차이점의 측정을 포함하고, 이러한 차이점은 다양한 공정 파라미터가 변경될 때, 공정의 다양한반응의 복잡한상호작용과 통계적변동에 원인이 된다. 공정결과는 일반적으로 정확하게 측정하기 어렵다. 많은 가변성의 요소들이 공정결과에 영향을 끼치고, 또한 다른 요소들로부터 고립된 단일요소를 변형하기란 어려운 일이다. 이러한 문제는 공정에 대한 요소의 영향의 한정적 이해로부터 뿐만이 아니라, 다양한 요소들이 복잡하고 밀접한 역영향과 상호작용을 일으킨다는 사실에 기인한다. 따라서, 생산기술자가 자신 있게 사용하는 시뮬레이션과 분석연장은 데이터의 측정된 정확함에 대한 더욱 높은 주문을 해야 한다. 데이터양식의 단순한 지시로는 불충분하다. 제조연장과 기술의 개발에 있어서 무엇이 요구되는가하는 문제는 구조에 있어서의 강한 변화보다는 특성들에 대한 작은 조정을 하는 것이다. 예를 들어, 트랜지스터의 LDD구조와 같은 집적회로구조를 향상시키는 것은 약 10 퍼센트 정도의 도펀트(dopant) 사용변화 또는 100° 인 적용온도의 변화등이다. 공정변화에 의한 작은 조정들의 결합과 이러한 변화의 결과를 측정하는데 따른 어려움은, 신호처리에 있어서 열등한 신호 대 잡음비(S/N 비)에 유사한 제조환경의 불리한 특성을 정확하게 나타낸다.

제조시뮬레이션연장은 시뮬레이션 테스트 전에 교정(calibrate)된다. 일반적으로 이 교정과정은 실험적으로 또는 이전 시뮬레이션에서 생성된 교정된 입력파라미터를 입력함으로써 이루어진다. 종래의 제조공정 교정에서는, 파라미터의 특정값은 특정한 공정출력값을 생산하는데 적합하다. 종래의 시뮬레이션과 교정 기술은 제조공정의 실제특성과 복잡함을 가지지 않으므로, 실제 시뮬레이션결과는 종래의 시뮬레이션과 교정기술을 사용하여 얻어지지 않는다. 더욱이, 종래 교정공정은 시뮬레이션연장이 유용하게 이용되기 전에, 기술자의 철저한 연구가 요구된다. 따라서, 교정공정은 공정자력부여와 개선에 있어서 상당한 지연이 따른다. 이러한 문제는 제조영역의 환경이 시간에 따라 변하더라도, 교정공정은 연속적으로 되풀이된다는 점에서 더욱더 악화된다.

이러한 제조환경의 특징들은 제조공정의 모니터링과 공정향상의 분석에 적용이 가능하다. 예를 들어, 최적의 결과를 얻기 위해 3주 동안 3퍼센트의 적은양의 공정결과와 변화를 추적하기 위해, 공정이 시간에 따라 어떻게 변하는지를 아는 것은 바람직한 일이다. 또한, 이러한 작은 차이점들이 통계적 변동과 측정 오류의 환경에서 전형적으로 측정되어진다.

제조환경에 있어서 많은 특징들이 불리한 것이라도, 몇몇의 특징들은 장점이있다. 이러한 장점들중 하나는 제조과정에 의한 구조의 명세는 명확하게 나타나있다. 또다른 장점은 제조과정의 여러 단계에서 요구되는 실제 인라인 측정데이터와 실제의 WET 데이터가 풍부하고, 쉽게 이용할 수 있다는 점이다. 상기 데이터는 제조공정에 관해 매우 유익한 통계적 프로파일 데이터를 포함한다.

무엇을 조사하여야하는 것은 통계적 변동, 복잡한 상호작용, 측정오류에 따른 부정확함을 피하거나 보상되어지도록 제조공정을 추적, 분석하는 기술이므로 작은 차이를 갖는 공정의 변형이라도 측정, 모니터, 분석되어질수있다.

#### 발명의 요약

따라서, 본 발명에 따른 반도체 제조공정의 통계적 시뮬레이션은 실제공정과 동시에 실시된다. 실제 제조 데이터에서 도출되고, 확률밀도함수의 형태로 표현되는 입력파라미터는 확률밀도함수형태의 실제제조공정을 차례로 모의실험(시뮬레이션) 하는 시뮬레이터에 적용된다. 각각의 시뮬레이션시스템은 문제의 최선의 해결책을 결정하기 위해 반복된 계산을 이용하는 시도와 오류방법인 몬테카를로법을 이용한 임의의 시도값으로 반복된다. 이러한 시뮬레이터는 확률분포형태로 출력을 생성한다.

상기 통계적 시뮬레이션은 시뮬레이션 운영이 실제 인라인의 측정데이터로 부터 공급 또는 파생된 입력파라미터를 이용하는 단스텝 피드백을 이용한다. 시뮬레이터에 의해 생성되는 출력데이터인 중간 출력구조 데이터와 WET 데이터는 측정데이터가 이용 가능한 환경에서의 실제 인라인 측정데이터와 매치된다. 모의 데이터가 인라인 측정데이터에 가장 가깝게 매치되도록, 시뮬레이터의 확률밀도구조는 각각의 공정시스템이 후 마다 조정된다. 이러한 단스텝 피드백의 중요한 사항은, 일련의 몬테카를로 시뮬레이션에 이용되는 것은 이전의 모든 스텝로부터의 교정결과를 이용하여 각각의 공정시스템을 교정하기 위해 존재한다는 것이다. 예를 들어, 공정이 50 개의 공정과정을 포함하고 교정모델을 만들기 위해 100 개의 몬테카를로 시뮬레이션시스템이 필요할 때, 시뮬레이션은 교정과정에서 각각 초기시스템부터 교정시스템을 갖는 5000 개의 시뮬레이션시스템을 포함할 것이다.

통계적 시뮬레이션은 두 가지 타입- 교정운영과 예측운영-의 시뮬레이션운영을 포함한다. 상기의 시뮬레이션운영은 모두 기본적인 최소단위로서 확률밀도함수를 이용하는 통계적 시뮬레이션이다.

교정운영은 실제 인라인측정데이터에 매치하는 모의 출력데이터를 교정한다. 시뮬레이션 운영자는 교정운영에 사용되는 실제 인라인 측정데이터를 구체적으로 지정한다. 예를 들어, 전형적인 제조공정에서, 특정 파라미터, 온도, 압력, 증착재료농도 같은 제조연장을 포함하는 각각의 공정파라미터가 지정되어있다. 교정의 결과들은 서로 비교되고, 파라미터가 이 비교된 결과에 따라서 새롭게 경신됨으로서, 선택된 제조특성을 위해 특정화된다.

본 발명의 상기 기술된 과정은 많은 장점을 가지고 있다. 그 중의 하나는 상기 장치와 그에 따른 방법은 인라인 제조공정라인에 대한 피드백으로, 광범위에 걸쳐 이용가능한 파라미터의 통계적 분석을 결합한다. 또한, 통계적 시뮬레이션에서 자동교정의 특징은 제조과정에서의 수동교정을 유리하게 보완할 수 있다. 시뮬레이션 운영자는 간단히 시뮬레이터의 파라미터값을 변화시킴으로서 제조파라미터를 수동적으로 교정



할 수 있다. 이러한 자동교정은 특정파라미터가 별도로 수정되고 이러한 수정결과를 쉽게 알 수 있는 교정체제를 갖추으로써 자동교정을 용이하게 한다. 따라서, 교정정보의 전체범위는 단일시스템의 피드백을 이용하여 특정한 파라미터의 수정된 결과를 독립적으로 추적하여 확보할 수 있다.

본 발명에 따른 방법의 다른 장점은 처리과정이 간소화되기 때문에, 제조된 소자의 결함율이 매우 낮다. 간소화된 과정에 따른 본 발명의 또다른 장점은 제조비용의 감소를 가져온다는 점이다.

### 도면의 간단한 설명

도 1 은 서로 결합하여 출력변수를 생성하는 두 개의 공정입력파라미터의 통계프로파일을 나타낸 종래의 제조과정의 블록박스 분석을 설명하기 위한 그래프.

도 2 는 본 발명의 실시 예에 따른 시뮬레이션 시스템구성을 나타낸 블록도.

도 3 은 도 2에 있어서 시뮬레이션 시스템의 투런(two-run)방식 처리과정을 나타낸 도.

도 4 는 본 발명의 실시 예에 따른 통계시뮬레이션 방법의 교정과정을 나타낸 플로우차트.

도 5 는 도 4 에 있어서 교정처리의 측정데이터 고역필터링동작을 나타낸 플로우차트.

도 6A 에서 6C 는 도 5의 측정데이터 고역필터링동작의 중간결과를 설명하기 위한 그래프.

도 7A 에서 7D 는 특정데이터의 고역필터링동작의 중간결과를 나타낸 그래프.

도 8 은 도 4 에서 설명된 교정처리의 한 스텝인, 실제데이터를 모의데이터에 매치시키는 동작과정을 나타낸 플로우차트.

도 9 는 본 발명의 실시 예에 따른 통계적 시뮬레이션의 예측과정을 나타낸 플로우차트.

도 10 은 본 발명의 실시 예에 따른 교정시스템의 전체 구조의 구성을 나타낸 플로우차트.

### 발명의 상세한 설명

도 2 는 시뮬레이션 시스템(200)의 구성을 나타낸 블록도로서, 상기 시스템(200)은 다양한 제조장비(210), 공정파라미터를 측정하는 다양한 시험장비(212), 시뮬레이션 컴퓨터시스템(214)으로 이루어진다. 실제 제조과정에서, 다수의 제조장비(210)는 제조과정에 있어서 각각의 단계를 수행하기 위해 사용된다. 제조과정의 여러 단계에서, 파라미터는 시험장비(212)를 사용하여 얻어진다. 이렇게 얻어진 파라미터 데이터는 전송경로(216)를 거쳐, 시뮬레이션 컴퓨터시스템으로 전달된다. 전송경로(216)는 전송선이나 네트워크라인과 같은 통신시스템이 이용된다. 다른 데이터전송방법은 마그네틱 디스크에 의한 전달과 같은 수동적 기술을 이용할 수 있다. 제조 장비(210)의 예는 CVD 증착기, 진공펌프, 이온 임플란테이션 장비, 증착장비, 포토리소그래피장비, 광정렬기, 포토마스크, 웨이퍼세정장비, 습식세척장비 등을 포함한다. 시험장비(212)는 제조기술에서 잘 알려진 잔여가스분석기, 스펙트럼분석기, 전기탐색침, 광량측정장비, 광현미경, 레이저 반사계장비, 분광기, 유사데이터습득연장 등을 포함하여 이루어진다. 또한, 시뮬레이션 컴퓨터시스템(214)은 공용 컴퓨터동작 기능과 처리데이터를 수신하기 위한 공용 통신동작을 포함하는 어떠한 컴퓨터시스템도 사용 가능하다. 본 발명을 위한 일 실시 예로서, SUN SPARC 20<sup>TM</sup> 서버와 x86 PC 인터페이스가 상기 컴퓨터시스템(214)에 사용되었다. 주문생산되는 Pdfab<sup>TM</sup> 시뮬레이션연장과 마이크로소프트 엑셀과 마이크로소프트 액세스 등의 종래의 소프트웨어가 데이터처리 동작에 사용된다.

상기 시뮬레이션 시스템(200)은 여러 가지 객관적 특성을 통합하는 제조회경을 위한 통계 분석도구이다. 첫째, 실제의 제조데이터통계가 가우스 프로파일에 분포되지 않을 수 있으므로, 상기 시뮬레이션 시스템(200)은 데이터가 입력, 처리, 출력되는 시뮬레이션과 분석에 임의의 통계적 분포프로파일을 제공한다. 둘째, 시뮬레이션 시스템(200)은 시뮬레이션 결과의 정확도를 향상시키기 위해, 이용가능한 어떠한 데이터도 활용할 수 있는 능력을 가진다. 시뮬레이션 시스템(200)은 통계적 데이터가 측정할 수 없거나 이용가능하지 않을지라도, 가장 확실한 시뮬레이션을 확보하기 위해서 데이터 보충(추가)을 허락한다. 셋째, 상기 시뮬레이션 시스템(200)은 신속적이고 모델이 향상되기 위한 시뮬레이션의 기초가 되게 한다. 넷째, 상기 시뮬레이션 시스템(200)은 실질적으로 모든 동작을 신속하고 자동적으로 공정에서 존재하는 데이터수집과 분석시스템과의 충돌없이 수행한다.

도 3에서와 같이, 시뮬레이션 시스템(200)에서의 투런방식 처리과정은 교정운행(310)과 예측운행(320)의 두가지의 서로 다른 운행모드를 가진다. 교정운행(310)에서는 이용가능한 데이터가 모의데이터와 측정된 데이터를 매치시키기 위한 함수를 생성하기 위해 처리된다. 상기 교정운행(310)은 단일 시뮬레이션스텝(312)과 실제 측정(314)으로 나뉘어져 있다. 시뮬레이션스텝(312)과 실제측정(314)의 결과는 적합함수(316)에 의해 처리된다. 상기 교정운행(310)은 연속된 시뮬레이션단계(312)를 포함하고, 각각의 단계는 파라미터와 인라인/WET 데이터와의 실제측정(314)에 대응한다. 다수의 시뮬레이션 스텝(312)들과 실제측정의 결과는 적합함수(316)를 생성하기 위해서 처리된다. 각각의 시뮬레이션 스텝(312)은 이전의 교정운행(310)동안 연산된 모든 적합함수를 이용하여 측정된 데이터를 처리한다.

예측운행(320)에서 교정운행(310)에서 측정된 데이터와 적합함수는 미지의데이터를 예측하는데 이용된다. 예측운행(320)동안 존재하는 데이터베이스에서 실증된 파라미터가 있을 때, 해당 교정운행(310)에서 사용되는 통계적분포함수는 상기 실증된 파라미터를 대신한다. 만약, WET 데이터 또는 인라인 파라미터가 상기 데이터베이스에 포함되어 있을 때, 이러한 WET 데이터 또는 인라인 파라미터는 적합함수의 변화없이 연산된 값에 대체된다.

다음, 도 4는 통계시뮬레이션방법의 교정처리(400)를 나타낸 플로우차트로서, 상기 교정처리(400)는 실제 인라인과정(420)과 시뮬레이션과정(450)의 두 개의 병렬과정을 포함한다. 상기 실제 인라인과정(420)은 과정에 필요한 파라미터를 초기화하는 웨이퍼 시작스텝(422), 단일선택제조과정단계를 수행하는 단일처리스텝(424), 선택된 공정과정의 결과를 측정하는 측정스텝(426), 선택된제조과정을 종료하는 공정종료스텝



(428), WET데이터 파라미터를 측정하기위한 측정 WET데이터시스템(430)을 포함한다. 다수의 공정과정에서 시뮬레이션분석에 적합한 각기 다른 스텝들의 조정은 이러한 방식으로 수행된다. 시뮬레이션에 적합한 공정단계는 집적회로의 기능 또는 구조에서 중요한 공정결과를 생성하고 (1), 측정가능한 결과를 생성하고 (2), 시뮬레이션이 가능하고 (3), 서로 다른 기능과 구조를 가진 시뮬레이션 파라미터의 변화에 대응한다 (4). 상기의 적합한 공정과정의 예는 채널임플란트 이전의 패드 산화, 게이트 산화, 게이트 에칭, 스페이서 산화과정 등을 포함한다. 전형적으로 처리과정단계에서 생기는 종적차원데이터와 횡적차원데이터를 포함하는 두가지 타입의 출력데이터가 측정된다. 종적차원데이터의 예는 산화성장, 게이트 산화두께, 폴리실리콘두께에 관한 데이터가 포함한다. 횡적차원데이터는 예를 들어 폴리실리콘 게이트길이, LDD스페이스의 폭 등에 관한 데이터를 포함한다.

도핑프로파일 데이터는 안정적이라고 가정하는 과정으로부터 생성됨으로서, 전형적으로 도핑프로파일은 측정데이터 보다는 파라미터 값의 이론적추측을 토대로한 시뮬레이션 동작을 하게한다. 본 발명에 따른 선택된 공정과정의 일예에서는 상기 단일처리시스템(424)은 게이트 산화과정을 수행하고, 인라인 측정스텝(426)은 산화두께의 데이터프로파일을 측정한다.

상기 시뮬레이션과정(450)은 실제의 인라인과정(420)과 함께 수행된다. 시뮬레이션 시작스텝(452)은 실제 인라인과정(420)의 초기화데이터에 응답하여 시뮬레이션과정(450)을 착수한다. 상기 웨이퍼 시작스텝(422)은 워크스트림(Workstream™)과 같은 공정제어시스템, 리모트 워크스트림(Remote Workstream™)과 같은 공정제어시스템의 원격접근채널, TCP/IP와 같은 서버와의 네트워크연결 등을 통해 시뮬레이션과정(450)으로 이동되는 오리엔테이션데이터와 같은 초기데이터를 생성한다. 시뮬레이션 시작스텝(452)은 시뮬레이션과정(450)의 파라미터를 임의의 사용자에게 의해 정해진 값으로 초기화한다. 상기 시뮬레이션 시작스텝(452)의 다음 스텝인 시뮬레이션 스텝(454)은 처음에는 임의의 사용자정의값을, 나중에는 실제 인라인 측정을 기초로하여 파라미터값을 적용하여 단일처리시스템(424)에서 실행되는 실제처리단계의 모의실험을 한다. 시간처리 등의 다양한 입력파라미터가 시험운영자에 의해서 할당된다. 이러한 입력파라미터는 단일처리시스템(424)과 시뮬레이션 스텝(454)에 적용된다. 입력데이터는 여러 가지 형태로 적용될 수 있다. 그러나, 상기 입력데이터는 실제과정이 시작되기 전에 통계적 분포함수로 변환된다. 입력데이터 포인트의 배열을 위해, 데이터는 동일하게 분류되고, 연속적으로 이어진 두개의 데이터 점사이의 데이터값의 확률은 같다고 추측한다. 평균과 표준편차와 범위한계를 갖는 데이터와 같은 통계적 형식의 데이터는 통계적 분포함수로서 사용하기위해 절단 가우스프로파일과 같은 통계 분포함수로 나타난다. 평균과 범위한계와 같은 통계적 형식의 데이터는 각각의 지정된 한계가 세가지의 표준편차에 의한 평균값으로 부터 도출되었다고 추측하는 통계적 분포함수로서 사용하기위해 절단 가우스프로파일과 같은 통계 분포함수로 나타난다. 만약, 평균이 범위한계의 중간이 아닐 때, 상기 함수는 비대칭프로파일로 모형화되고, 동일한 모집단과 상이한 표준편차를 갖는 두 개의 하프-가우스프로파일의 조합으로 간주된다. 추가정보가 이용가능할 때, 단일 데이터점으로 나타나는 데이터는 극소한 파라미터만을 위해 사용된다. 중간결과를 포함한 각각의 실제 또는 시뮬레이션 결과는 단일 데이터정보보다는 통계적 분포함수로서 시뮬레이션과 공정과정에 적용된다.

시뮬레이션 과정(454)은 시뮬레이션시스템이 여러 번 반복되는 통계시뮬레이션을 기초로하여 작동한다. 각각의 시뮬레이션실행은 각 입력 통계적분포함수로 부터의 값을 연산하고, 해당하는 물리적모델 또는 소자 모델에 따라서 입력값을 처리하여, 각각의 출력 통계적분포함수의 값을 얻는다. 시뮬레이션의 반복횟수가 더 많을수록 출력분포의 정확도를 향상시킨다.

본 발명에 따른 입력처리파라미터의 한예는 처리시간 파라미터이다. 또한, 다양한 실제 인라인 측정결과와 단일처리단계에서 얻어진다. 이러한 인라인 측정결과는 고역필터링스텝(456)을 거쳐, 상기 시뮬레이션스텝(454)에 전달된다. 상기 고역필터링스텝(456)은 단일 처리시스템(424)으로 부터의 입력 파라미터와 인라인 측정데이터를 필터링하고, 이산확률 밀도함수출력을 생성하기위해 디지털화한다. 상기 시뮬레이션스텝(454)에서 생성된 시뮬레이션결과는 모의프로파일생성스텝(458)과 무작위시드스텝(460)으로 전달된다. 상기 무작위시드스텝(460)은 몬테카를로방식 시뮬레이션에 필요한 시드값을 경신하고, 경신된 시드값을 상기 시뮬레이션스텝(454)에 공급한다. 상기 모의프로파일생성스텝(458)에서는 실제결과와 모의결과의 분석을 매칭하는데 이용되는 모의프로파일을 구성한다. 시뮬레이션은 다수의 몬테카를로단계에서 일어나고, 이때 각각의 몬테카를로단계는 상기 시뮬레이션스텝(454)과 무작위시드스텝(460)을 통하는 1 패스를 포함한다.

상기 시뮬레이션스텝(454)과 무작위시드스텝(460)에서의 다중패스 피드백스텝들은 상기 시뮬레이션시스템(200)의 교정을 위한 단일스텝 피드백개념의 실례가 된다. 각각의 시뮬레이션시스템은 다른 시뮬레이션스텝들과는 별도로 평가된다. 한 시뮬레이션 스텝에서는, 데이터가 측정되고 시뮬레이션 스텝으로 전달되어 그 시뮬레이션의 결과가 처리과정으로 피드백된다. 시뮬레이션의 결과는 시뮬레이션시스템에서 측정되어진 데이터의 적합함수를 연산하는데만 이용된다. 단일스텝 피드백개념을 이용하여, 측정된 데이터는 시뮬레이션의 정확도를 향상시키기위해 유연하게 사용될 수 있고, 서로 다른 시뮬레이션간의 상호작용과 전파현상이 감소된다.

상기 단일스텝 피드백 개념은 전체 시뮬레이션동작이, 짜맞추어진 모든 시뮬레이션 스텝의 중간 출력값과 한 번에 모두 연산되는 출력 적합함수를 갖는 각 시뮬레이션 실행에서 끝나는 종래 방식의 시뮬레이션과는 본질적으로 다르다.

상기 단일처리시스템(424)의 뒤를 이어 인라인 측정스텝(426)에서는 산화두께의 데이터프로파일을 측정하고, 데이터프로파일 결과를 실제데이터/모의데이터비교스텝(462)으로 전달한다. 상기 실제데이터/모의데이터 비교스텝(462)은 모의프로파일생성스텝(458)로부터 모의데이터와 인라인 측정데이터(426)로부터 실제 인라인데이터를 수신하여, 이 데이터프로파일들을 각 디지털 표본별로 - 예를 들어, 프로파일들의 점의 차를 계산하여- 비교한다. 이렇게 형성된 차분프로파일은 차분프로파일저장스텝(464)에 저장된다. 변환을위한 매칭결정스텝(466)은 이전 모의데이터를 사용하여 모의프로파일데이터를 변환할지, 또는 상기 데이터비교스텝(462)에서 결정된 차분프로파일을 기초로 실제 데이터를 변환할것인지를 결정한다. 변환동작은 매칭처리 변환스텝(468)의 모의프로파일데이터에 의해서 실행된다. 상기 매칭처리 변환스텝(468)에서는 상기 데이터비교스텝(462)로부터의 차분프로파일을 기초로 하여, 상기 모의프로파일생성스텝



(458)로부터 수신한 모의프로파일을 반복적으로 변환시킨다. 상기 매칭처리 변환스텝(468)에서는 상기 차분프로파일과 모의프로파일을 합성하여, 이후의 시뮬레이션을 위해 무작위 추출된 모의점과 변환된 모의점을 비교하는데 이용되는 변환함수를 생성한다. 상기 변환함수를 얻기위한 한 방법으로 뉴턴의 보간법이 이용된다. 따라서, 실제측정데이터에 의해 정의되는 데이터범위에 뉴턴의 보간법은 백분위수매칭에 근거한 연속함수를 정의하는데 이용된다. 반면, 실제측정데이터에 의해 정의되지않는 데이터범위에는 제 3 배열다항식이 연속함수를 정의하는데 사용된다. 이러한 매칭법은 유연성과 정확성사이에서의 적당한 균형을 유지시킨다.

각각의 단일처리시스템과 시뮬레이션시스템이 완료되고 모의프로파일이 생성된 후, 추가 공정과정을 위해 처리시스템이 추가적으로 수행되거나, 다양한 시뮬레이션, 고역필터, 모의프로파일생성, 무작위시드, 실제데이터/모의데이터 비교, 차분프로파일저장, 변환하기위한 매칭결정 등을 포함하는 시뮬레이션 처리시스템과 매칭처리 변환시스템이 추가적으로 수행될 수 있다. 실제 인라인 제조에서의 각 단일처리시스템과 그에 해당하는 시뮬레이션에서는 무작위 입력파라미터 데이터를 이용, 실제인라인 전과정과 시뮬레이션 전과정이 실행되어, 독립적인 처리단계는 실제제조시스템과 모의시스템이 함께 수행된다.

모든 실제과정 스텝이후에, 실제 과정은 실제 과정종료스텝(428)으로 종결되고, 측정 WET데이터스텝(430)은 제조과정의 최종출력데이터를 측정하여 WET데이터 프로파일을 생성한다. 상기 WET 데이터는 필터링된 WET 데이터를 생성하는 고역필터스텝(473)에서 처리된다.

한편, 모든 모의과정 스텝이후, 시뮬레이션과정은 모의과정종료스텝(470)에서 종결되고, 완전한 장치시뮬레이션이 장치시뮬레이션스텝(471)에서 실행된다. 상기 장치시뮬레이션스텝(471)은 이전의 시뮬레이션스텝에서 도출된 프로파일 정보를 모아서 무작위시드 시뮬레이션을 이용, 몬테카를로분석을 한다. 장치시뮬레이션프로파일생성스텝(471)은 실제 연산된 WET 데이터에 해당하는 장치프로파일을 생성한다. 장치프로파일매칭스텝(474)은 WET 데이터와 장치시뮬레이션스텝(472)에서 생성된 장치데이터를 각 디지털표본마다 - 예를 들어, 프로파일들의 점의 차를 계산하여- 비교한다. 이렇게 생성된 장치차분프로파일은 장치차분프로파일저장스텝(476)에서 저장된다. WET데이터 변환을 위한 매칭결정스텝(478)은 이전의 모의WET데이터를 이용하여 모의프로파일데이터를 변환할지, 또는 상기 장치프로파일매칭스텝(474)에서 결정된 차분프로파일을 기초로 실제 WET데이터를 변환할것인지를 결정한다. 변환동작은 교정처리(400)의 최종출력프로파일을 생성하기위해 WET 통계프로파일 변환스텝(480)의 모의 WET데이터에 의하여 수행된다.

상기 교정처리(400)에서 생성된 출력데이터는 매칭프로파일과 모의프로파일 모두를 포함한다.

본 발명에 따른 교정처리(400)의 실시예에 있어서, 실제 인라인과정(420)과 시뮬레이션과정(450)은 함께 병행하여 동시에, 실시간에서 완전히 자동적으로 실시된다. 또한, 다른 실시예에 있어서, 실제 인라인과정(420)과 시뮬레이션과정(450)이 함께 병행하여 실시되나, 실시간에 처리되지는 않는다. 따라서, 다양한 실제처리과정시스템과 시뮬레이션시스템들이 별도로 실제 인라인과정(420)의 측정결과에서 얻어진 데이터와 수행되고, 상기 고역필터스텝(456)과 같은 스텝에서 필터링되고, 오프라인 시뮬레이션과정(450)과 통신한다.

상기 교정처리(400)의 다른 실시예에 있어서, 상기 실제 인라인과정(420) 으로부터 인라인 데이터는 자동적으로 추출되고, 상기 고역필터스텝(456)과 같은 스텝에서 고역필터링동작은 실제 인라인데이터의 이전에 선택된 표본을 위해 자동적이고 주기적으로 수행된다.

도 6A 에서 6C는 도 5 의 플로우차트와 관련하여 고역필터링측정데이터를 위한 고역필터링동작을 그래프로 설명하고 있다. 고역필터링동작은 예를 들어 도 4의 상기 고역필터스텝(456)(473)에서 수행된다. 도 5 는 측정데이터를 필터링하는 고역필터링동작(500)의 스텝들을 설명하기위한 플로우차트이다. 데이터는 측정스텝(510)에서 측정되고, 측정된 데이터는 히스토그램 채움스텝(512)의 다수의 양자화된 오차범위( $\delta x$ )들의 각각의 범위의 셈에 넣어진다. 데이터는 프로세스 파라미터, 인라인측정치수 데이터, WET데이터의 형식을 취한다. 일반적으로, 프로세스파라미터는 제조과정동안 측정, 관찰, 지정되는 어떠한 적합하고 의미있는 프로세스파라미터도 가능하다. 적합한 프로세스파라미터는 퍼니스온도, 증착시간 등을 포함하여 구성된다. 상기 인라인측정치수데이터는 게이트산화처리시스템을 위한 산화두께, 증착스텝에 필요한 폴리실리콘 두께 등의 처리결과와 측정치수를 포함한다. 상기 WET 데이터는 문턱전압( $V_{th}$ ), 포화문턱전압( $V_{sat}$ ), 최대 트랜스컨덕턴스( $G_m$ ), 포화전류( $I_{dsat}$ ) 등과 같은 전기적 파라미터측정결과를 포함한다. 채널임플란트스텝, 게이트산화스텝, 게이트에칭스텝, 스페이서산화스텝전의 패드산화의 처리시스템은 이러한 WET데이터 파라미터를 제어하는데 가장 큰 영향을 끼친다. 프로세스파라미터는 입력파라미터의 역할을 하는 특정파라미터값을 프로세스에 지정한다. 상기 인라인측정치수데이터와 WET데이터는 결과로서 측정되고, 입력파라미터로서 상기 프로세스에 입력된다.

도 6A 는 실제 인라인 데이터측정치수값의 히스토그램을 나타낸 것으로서, 가로축은 양자화된 오차범위( $\delta x$ )를 나타내고, 세로축은 측정치수값의 각각의 범위( $\delta x$ )에서 하강하는 데이터 점의 수를 표시한 것이다. 도 6A 에서 6C 관하여 설명된 고역필터링동작은 치수측정되고 관찰된 데이터에의해서 수행된다.

도 5 에서, 오차양자화스텝(514)은 오차범위( $\delta x$ )의 양자화를 특정방식에의해 스텝크기( $\delta y$ )로 변경하여, 각 스텝크기( $\delta y$ )가  $\delta x$  보다 작은 가장 큰 값이고, 양의의 정수( $n$ )에 의해 나누어진 최대, 최소값의 차  $(x)$ 와 동일한 값을 갖는다. 도 6B 는 실제 인라인데이터측정치수값의 히스토그램을 나타낸 것으로서, 가로축은 양자화된 스텝크기( $\delta y$ )의 정수( $n$ ) 집단화를 나타낸다. 이러한 값은 데이터 정규화스텝(516)에서 정규화되어, 각 히스토그램값은 각 스텝크기범위안에서 하강하는 데이터점의 총수의 비율을 나타낸다. 도 5 의 확률밀도함수 도출스텝(518)은 실제 인라인 파라미터값의 확률밀도함수를 연산한다. 도 6C 는 확률밀도함수의 일례를 나타낸다. 도 5 의 확률밀도함수표생성스텝(520)에서는  $n$  확률밀도함수표를 스텝( $\delta y$ )의 오름차순으로 어셈블한다.

도 7A 에서 도 7D 는 고역필터링 특정데이터를 위한 고역필터링동작을 그래프로 설명한다. 특정데이터에서, 확률밀도함수는 실험적으로보다는 이론적으로 도출되어 어떤 데이터도 처리되지 않는다. 특정데이터는 여러 가지 통계파라미터에 의해서 지정된다. 예를 들어, 확률밀도함수가 도 7A 와 같은 가우스분포에 일치하도록, 특정데이터는 평균파라미터값( $\mu$ ), 표준파라미터값( $\rho$ ), 최대파라미터값, 최소파라미터값에 의해서 지정된다. 다른 예로서, 확률밀도함수가 도 7B 와 같은 가우스분포에 일치하도록, 특정데이터는



평균파라미터값( $\mu$ ), 표준파라미터값( $\rho$ )에 의해서만 지정된다. 또 다른 예로서, 다른 예로서, 확률밀도 함수가 도 7C와 같은 비대칭 가우스분포에 일치하도록, 특정데이터가 평균파라미터값( $\mu$ ), 최대파라미터값, 최소파라미터값에 의해서 지정된다. 마지막으로 확률밀도 함수가 도 7D와 같은 가우스분포에 근접하도록, 특정데이터는 평균파라미터값( $\mu$ )에 의해서만 지정된다. 일반적으로, 비교적 더 많은 파라미터가 공급될 때, 더 적합한 확률밀도 함수가 연산된다.

도 8은 상기 도 4의 실제데이터/모의데이터 비교시스템(462), 장치프로파일 매칭시스템(474)에서 실행되는 매칭동작(800)을 플로우차트로서 나타내고 있다. 첫째, 실제데이터는 도 5의 방법으로 광역필터링된다. 특히, 상기 매칭동작(800)은 도 5의 히스토그램채움시스템(512), 오차양자화시스템(514), 데이터정규화시스템(516), 확률밀도함수도출시스템(518), 확률밀도함수생성시스템(520)을 포함한다. 프로파일매칭시스템(820)에서, 상기 모의프로파일생성시스템(458)과 장치시뮬레이션프로파일생성시스템(471)과 같이 모의데이터를 생성하는 스텝에서 생성되는 모의데이터를 위한 확률밀도표는 상기 스텝(518)에서 생성되는 실제데이터를 위한 확률밀도표와 일치한다. 프로파일일치동작에서는 모의프로파일의 각각의 다양한 가변스텝크기범위안에서 하락하는 데이터점의 총수의 비율이 실제데이터프로파일의 각각의 고정스텝크기범위의 데이터점의 비율과 일치되기 위해 모의프로파일의 스텝크기( $\delta y'$ )를 강제한다. 이러한 방식에서, 스텝표본의  $n$  배열의 4배인 다른 프로파일이 생성된다. 각각의  $n$  스텝크기표본에는 각 스텝 구성요소의 총 데이터점의 비율을 나타내는 진폭 숫자, 실제 데이터를 위한 상향 고정치수( $\delta y$ ) 스텝, 일치 모의 데이터를 위한 상향 가변치수( $\delta y'$ ) 스텝, 차분스텝크기( $\delta y - \delta y'$ )를 나타내는 요소 등의 네가지 요소가 저장되어있다.

최적함수 결정시스템(822)에서, 진폭숫자의 최적함수는 -본 발명의 속하는 분야에서 잘 알려져있듯이- 다항식 적합함수, 스플라인함수 등을 이용하여 도출된다. 최적함수의 일예에서는 상수함수가 적용되어 유수가 연산되고, 선형다항식적합이 적용되고 유수가 연산된다. 유수(차)가 지정량보다 적을 때, 상수함수는 최적의 함수를 제공한다. 만약 상수함수 또는 선형다항식함수가 최적함수를 제공하지 못할 때, 두 번째 다항식함수를 적용한다. 가장 적합한 상태를 찾을때까지 상위의 다항식함수부터 적용한다. 일반적으로, 최적의 시뮬레이터는 상수함수가 최적적합도를 갖는 시뮬레이터이다. 만약 상수함수가 최적적합도를 갖지않을 때, 하위 다항식함수가 최적상태를 갖는다.

본 발명에 따른 매칭동작(800)에 의해 얻어지는 장점은 교정출력통계분포와 실제 데이터 사이에서 자동으로 획득하는 정확한 적합함수에 의한 높은 시뮬레이션정확도를 가질수있다는 것이다. 상기 동작은 파라미터와 데이터측정의 범위는 백분위수의 직접상관관계에 의해 간단하게 연산되어질수 있도록, 전체 백분위수의 분포가 알려져있는 두 개의 모집단에 통계적으로 적합한다. 이는 예를 들어 출력 통계분포함수의 10%, 35%, 75%가 실제 데이터의 10%, 35%, 75%에 사상된다. 데이터점 사이의 데이터 값은 보간법에 의해 정확하게 측정된다.

상기 매칭동작(800)에 의해 얻어지는 또다른 장점은 프로세스가 유연하게 실행되고, 어느 데이터표본의 프로파일에도 적용가능하다는 것이다. 다른 장점은 적합함수를 범위 밖의 데이터점에도 적용할수 있다는 것이다. 또한, 저역필터와 고역필터를 측정의 부정확도를 보상하는 결과데이터에 적용할수 있다는 것이다.

또한, 상기 매칭동작(800)은 범위밖의 데이터를 처리하고, 종래의 한계밖의 값을 가지는 실험프로세스파라미터를 적용하므로써 얻어지는 생성가능한 결과를 예측한다. 따라서, 매칭동작(800)은 고정데이터에 의해서 정의되는 영역밖으로 확장될 수 있다. 수치분석이론에 따르면, 보외함수가 상위에 있으수록, 오차가 더 커진다. 적합함수의 정확도와 유연성을 위해 세 번째의 다항식이 고정데이터에 의해서 정의되지 않은 영역의 적합함수에 이용된다.

교정처리의 뒤를 이어 예측처리가 실행된다. 운영자는 운영자선택 입력파라미터 또는 프로파일을 포함하는 예측처리를 위한 입력파라미터를 지정한다. 지정되지않은 파라미터는 고정처리에서 도출된 파라미터 또는 프로파일을 디폴트한다. 도 9에서 보듯이, 운영자지정 입력파라미터와 운영자지정 입력프로파일이 기입되고, 디폴트입력파라미터/프로파일이 설정되는 시뮬레이션시작시스템(910)으로 부터 예측처리(900)가 시작된다. 사용자정의 시뮬레이션시스템(912)에서 시뮬레이션이 시작되고, 사용자지정데이터와 데이터 처리표에서의 데이터를 이용하여 프로파일이 도출된다. 다음, 모의프로파일시스템(914)에서 모의프로파일이 생성된다. 매칭변환시스템(916)은 차분프로파일과 모의프로파일을 합성하여, 변환함수를 생성한다. 변환구조는 스텝(918)에서 도출된다. 처리종료시스템(920)에서 예측시뮬레이션을 종료할때까지 다양한 처리파라미터가 이러한 방식으로 모의실험된다. 그 뒤, 장치시뮬레이션이 장치시뮬레이션시스템(922)에서 수행된다. 장치시뮬레이션으로 부터 생성된 프로파일은 변환목적 매칭시스템(924)에서 매칭되어, 모의 WET데이터를 생성한다.

장치시뮬레이션에서 도출되는 WET데이터는 동일한 매칭과 변환기술을 이용하여 처리시뮬레이션 후의 인라인 데이터와 똑같은 방식으로 결정된다.

본 발명에 따른 모의 처리방법의 장점은 모의데이터와 실제데이터 모두가 동일하게, 결정론적방식보다는 통계적방식으로 다루어진다는 점이다. 또한, 모든 실제 인라인데이터와 WET 데이터가 시뮬레이션의 정확도를 향상시키는데 이용가능하다. 더욱이, 안정성이 향상된 제조과정을 위해, 데이터 적합과정은 자동적으로 이루어진다. 또한, 처리과정에서의 물리적교정이 필요하지 않아서 제조연장이 제조공정에서 사용되기전에 이루어지는 시뮬레이션에 의해서 자동교정이 가능하다. 또다른 장점은 본 발명에 따른 모의데이터는 파라미터의 정확도를 향상시킨다.

도 10은 제조시스템의 전체구조(1000)를 설명하기 위한 블록도로서, 제조공정(1010)은 인라인 데이터블록(1012)에서 어셈블되는 실제 인라인 데이터를 생성하고, WET데이터 측정시스템(1016)의 도출정보를 생성한다. 이 WET 데이터는 WET데이터블록(1018)에서 어셈블된다. 인라인 데이터와 WET데이터는 데이터베이스(1020)로 입력되고, 데이터베이스(1020)의 데이터는 주 간격과 같은 정해진 간격으로 자동데이터추출시스템(1022)에서 처리된다. 이렇게 처리된 데이터는 데이터처리블록(1024)에서 어셈블되고, 고정처리(1026)에 응용된다. 매칭절차는 데이터베이스(1020)로 입력되는 프로파일과 데이터를 도출하기위해 매칭함수블록(1028)에서 실행된다. 상기 도출된 프로파일과 데이터는 예측처리(1030)에 응용된다. 데이터베이스(1020)에서 선택된 정보는 또한 수동추출블록(1032)에서 수동으로 추출되고, 이 데이터는 운영자에의해 공급



된 데이터(1034)와 함께 수동데이터처리블록(1036)으로 전달된다. 상기 데이터처리블록(1036)에서 도출된 데이터는 상기 예측처리(1030)로 전달되고, 교정처리(1038)는 또한 수동데이터처리블록(1036)의 데이터를 이용하여 실행된다. 교정처리(1038)에서 공급된 정보는 수동매칭함수블록(1040)에서, 상기 예측처리(1030)에도 입력되는 선택된 데이터의 수동적 추출에서 얻어진 데이터와 프로파일을 도출하는데 이용된다. 상기 예측처리(1030)는 블록(1042)의 다양한 응용에 필요한 예측정보를 생성한다.

교정운영의 실용적이용은 모든 일정한 파라미터를 보유하고, 시간적으로 실제 인라인 데이터 측정치수를 취하여 제조과정을 모의실험하는 것이다. 예를 들어, 본 발명에 따른 방법의 실시에서는 시간에 걸쳐 처리특성의 변화를 검출하기위해 매 주 또는 몇 주마다 데이터를 측정할 수 있다. 또한, 본 발명에 따른 통계적 시뮬레이션 방식은 제조과정, 공정개발과 향상의 모니터링, 서로 다른 제조과정을 위한 데이터의 비교 등에도 응용할 수 있다.

본 발명에 관해서 위에서 상세하게 기술되어있지만, 본 발명은 상기에 기술된 실시예에서만 국한되어있지 않다. 상기의 분야와 기술에 익숙한 사람들은 이후에 첨부된 청구범위에 기술되어 정의되어있는 본 발명의 영역과 취지안에서 다양한 변화, 대응, 변형이 가능하다.

## (57) 청구의 범위

### 청구항 1

제조공정의 소재에 적용되는 제조공정시스템을 수행하기위한 제조장비와;

상기 소재로부터 감지된 공정테스트 파라미터의 표본을 획득하는 테스트장비와;

상기 공정테스트파라미터 표본을 수신하기위해 테스트장비에 연결된 컴퓨터와;

상기 공정테스트파라미터 표본을 수신하는 루틴, 다수의 모의제조공정결과를 생성하기위해 제조공정시스템에 대응하는 모의제조공정시스템을 시뮬레이션하는 루틴, 모의제조공정결과를 나타내는 모의프로파일을 생성하는 루틴등의 다수의 루틴을 포함하고, 컴퓨터시스템에서 사용가능한 소프트웨어 프로그램을 포함하는 것을 특징으로 하는 제조 모니터링시스템.

### 청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 소프트웨어 프로그램은 임의의 시드값을 이용하여 시뮬레이션결과를 반복적으로 갱신하는 몬테카를로 시뮬레이션루틴을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 제조 모니터링시스템.

### 청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 소프트웨어 프로그램은 다수의 공정테스트 파라미터 표본을 공정데이터 프로파일에 포맷하는 루틴과;

상기 공정데이터 프로파일과 모의 프로파일을 매칭하는 루틴을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 제조 모니터링시스템.

### 청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 소프트웨어 프로그램 시뮬레이션루틴은 반도체 제조공정의 통계시뮬레이션이고, 실제 제조공정 파라미터에서 시뮬레이션으로, 확률 밀도함수로부터 도출되는 입력파라미터를 도출하는 서브루틴과;

확률밀도함수로 모델화되는 실제제조공정을 시뮬레이션하는 서브루틴을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 제조 모니터링시스템.

### 청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 소프트웨어 프로그램 시뮬레이션루틴은 상기 제조공정시스템과 동시에 수행되는 것을 특징으로 하는 제조 모니터링시스템.

### 청구항 6

제 4 항에 있어서,

상기 소프트웨어 프로그램 시뮬레이션루틴은 몬테카를로 방식을 사용하여 다양한 임의의 가변 시드값을 응용하는 다수의 시뮬레이션시스템을 반복하는 서브루틴을 더 포함하는, 반도체 제조공정의 통계시뮬레이션 임을 특징으로 하는 제조 모니터링시스템.

### 청구항 7

제 4 항에 있어서,

상기 소프트웨어 프로그램 시뮬레이션루틴은 다수의 시뮬레이션시스템중 하나의 시뮬레이션시스템이 실제 인라인 측정데이터로부터 공급된 입력파라미터를 사용하여 출력데이터를 생성하는 단일시스템 피드백을 이용하는 시뮬레이션루프루틴과;



상기 시뮬레이션시스템에서 생성된 출력데이터와 실제 인라인측정데이터를 매칭하는 서브루틴과;

모의데이터가 실제 인라인 측정데이터에 더욱 가깝게 부합하도록 각 모의스텝이후에 시뮬레이션 프로그램의 확률밀도구조를 조정하는 서브루틴을 더 포함하는, 반도체 제조공정의 통계시뮬레이션임을 특징으로 하는 제조 모니터링시스템.

#### 청구항 8

제조공정의 소재에 적용되는 제조공정시스템을 수행하고;

상기 소재로부터 감지된 공정테스트 파라미터의 표본을 획득하고;

다수의 모의제조공정결과를 생성하기위해 상기 제조공정시스템에 대응하는 모의제조공정시스템을 시뮬레이션하고;

상기 모의제조공정결과를 나타내는 모의프로파일을 생성하는 과정을 포함하는 것을 특징으로 하는 제조공정의 모니터링방법.

#### 청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 시뮬레이션과정은 임의의 시드값을 이용하여 시뮬레이션결과를 반복적으로 갱신하는 몬테카를로 시뮬레이션루틴을 수행하는 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 제조공정의 모니터링방법.

#### 청구항 10

제 8 항에 있어서,

다수의 공정테스트 파라미터 표본을 공정데이터 프로파일에 포맷하는 과정과;

상기 공정데이터 프로파일과 모의 프로파일을 매칭하는 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 제조공정의 모니터링방법.

#### 청구항 11

제 8 항에 있어서,

상기 시뮬레이션과정은 반도체 제조공정의 통계시뮬레이션과정이고, 확률밀도함수에서 도출되는 입력파라미터를 실제 제조공정 파라미터에서 시뮬레이션으로 도출하는 과정과;

확률밀도함수로 모델화되는 실제제조공정을 시뮬레이션하는 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 제조공정의 모니터링방법.

#### 청구항 12

제 11 항에 있어서,

상기 시뮬레이션과정은 상기 제조공정시스템과 동시에 수행되는 것을 특징으로 하는 제조공정의 모니터링방법.

#### 청구항 13

제 11 항에 있어서,

상기 시뮬레이션과정은 반도체 제조공정의 통계시뮬레이션이고, 몬테카를로 방식을 사용하여 다양한 임의의 가변 시드값을 응용하는 다수의 시뮬레이션시스템을 반복하는 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 제조공정의 모니터링방법.

#### 청구항 14

제 11 항에 있어서,

상기 시뮬레이션과정은 반도체 제조공정의 통계시뮬레이션이고, 다수의 시뮬레이션시스템중 하나의 시뮬레이션시스템이 실제 인라인 측정데이터로부터 공급된 입력파라미터를 사용하여 출력데이터를 생성하는 단일스텝 피드백을 이용하는 시뮬레이션루프를 순환하는 과정과;

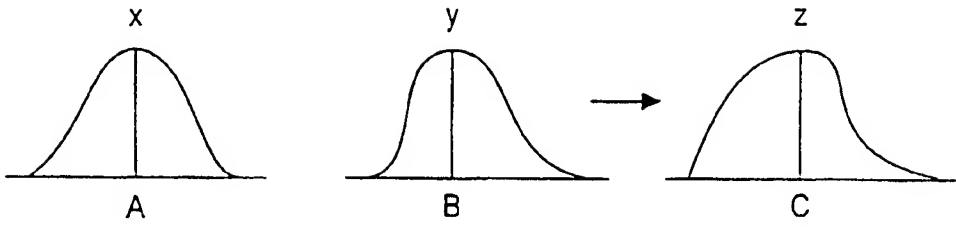
상기 시뮬레이션시스템에서 생성된 출력데이터와 실제 인라인 측정데이터를 매칭하는 과정과;

모의데이터가 실제 인라인 측정데이터에 더욱 가깝게 매치하도록 각 시뮬레이션시스템이후에 시뮬레이션 프로그램의 확률밀도구조를 조정하는 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 제조공정 모니터링방법.

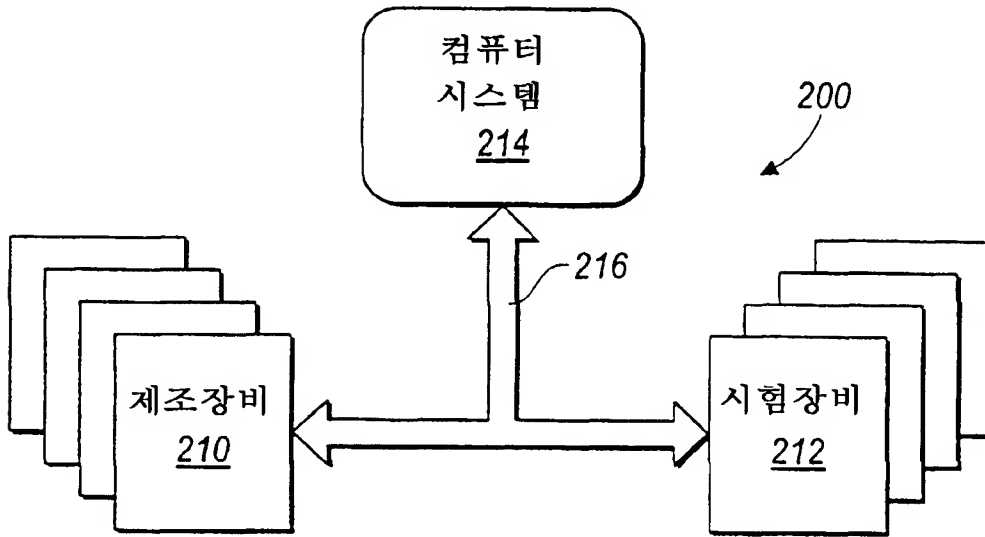
도면



도면1

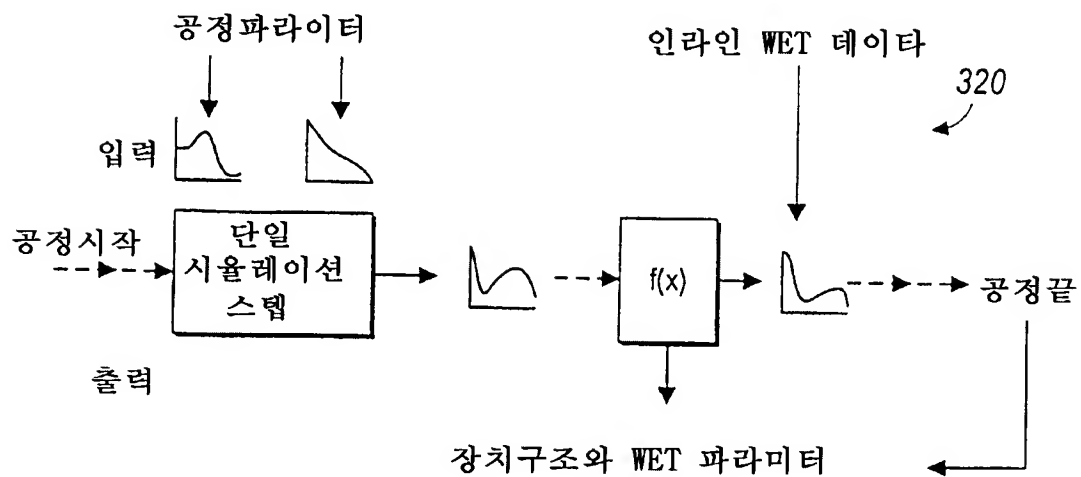
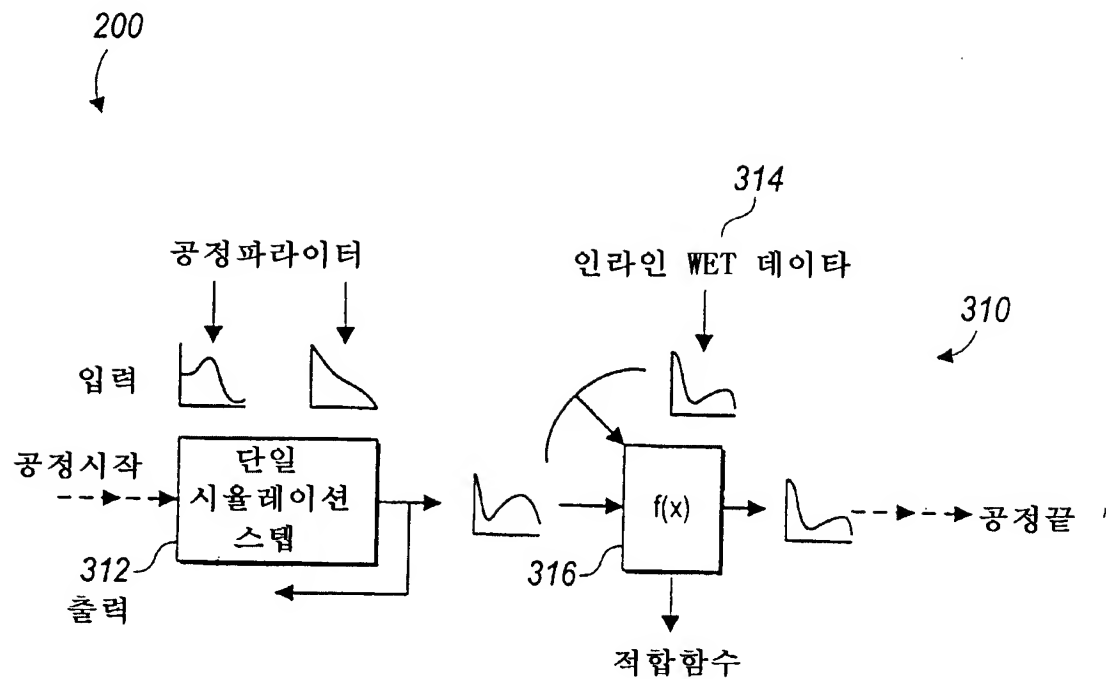


도면2



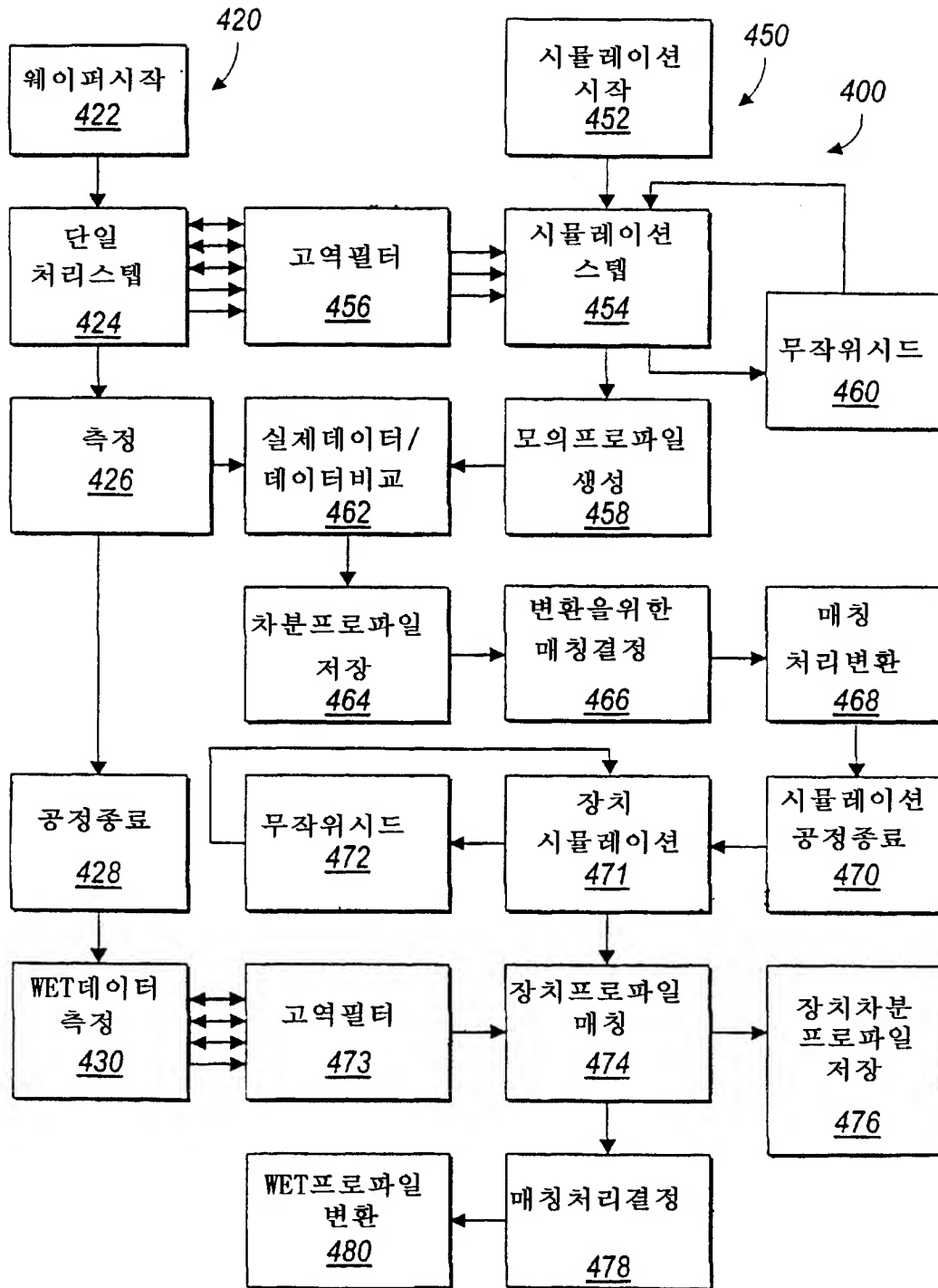


도면3



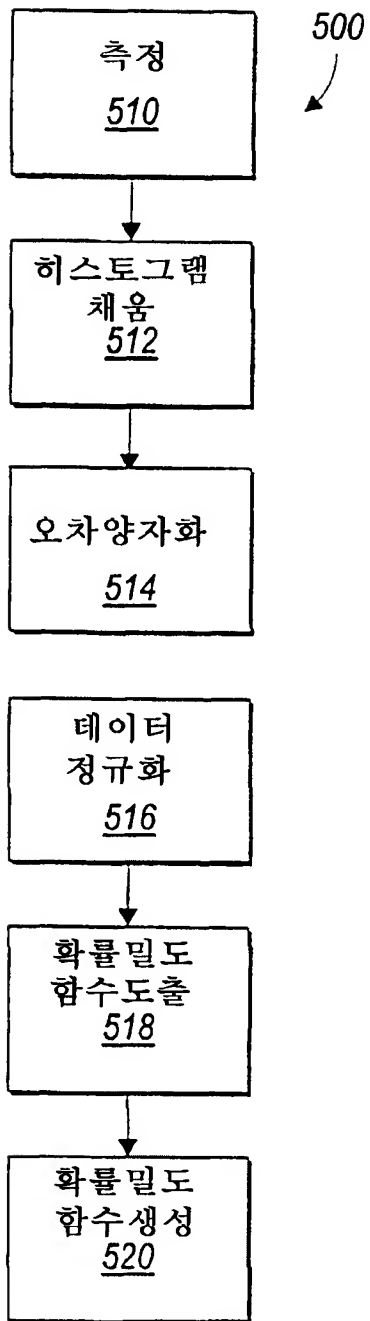


도면4

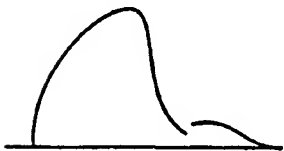




도면5

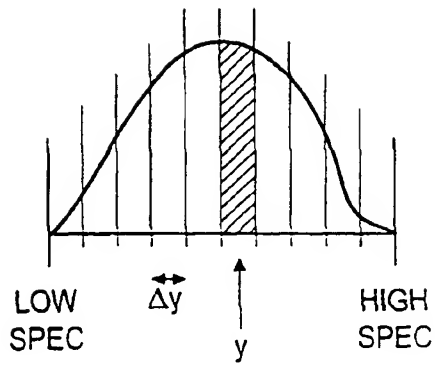


도면6A

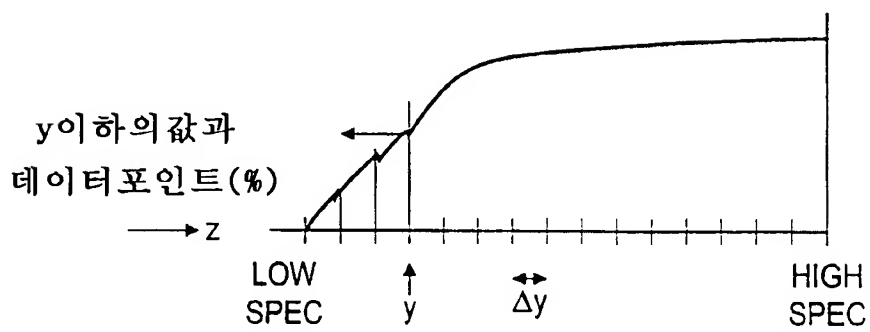




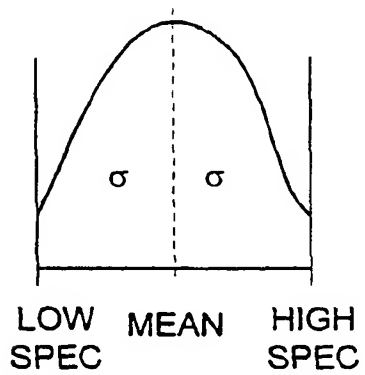
도면68



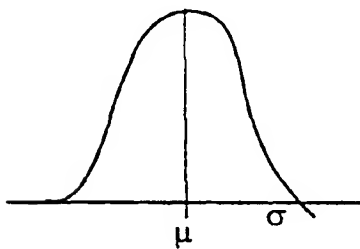
도면69



도면7A

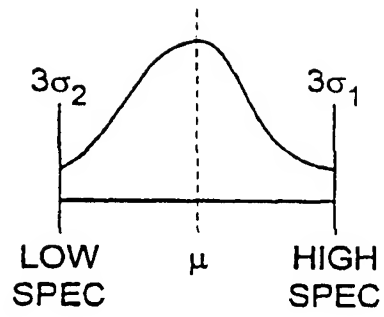


도면7B

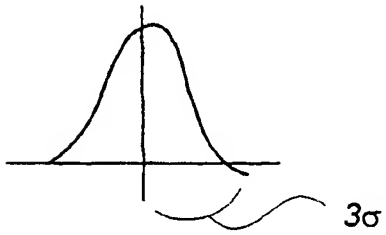




도면 70

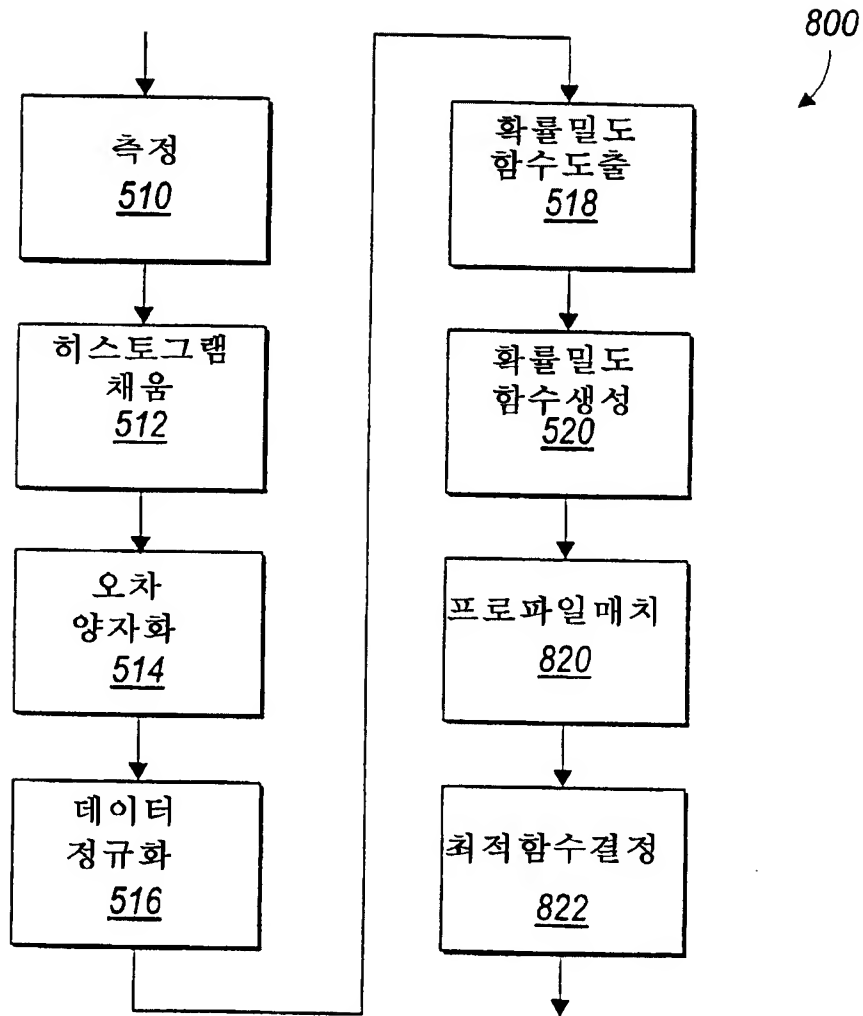


도면 70



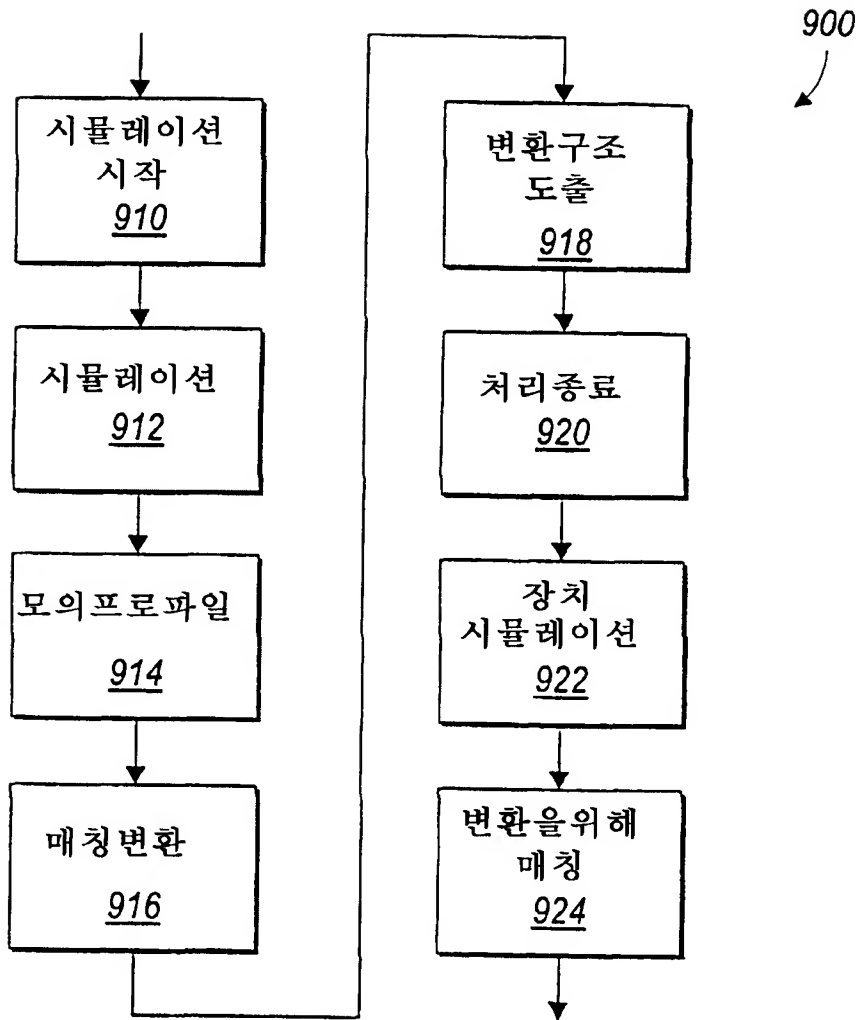


도면8





도면9





도면 10

